

Über die Interaktion fast paralleler sowie kollidierender Kraftstoffsprays

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

M.-Sc. Regine Mantel geb. Gramlich

aus Ochsenfurt

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. C. Tropea, TU Darmstadt

1. Mitberichterstatter: PD Dr.-Ing. I.V. Roisman, TU Darmstadt

2. Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Wensing, FAU Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 11.04.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 11.07.2017

Darmstadt 2017

D17

Erklärung Hiermit versichere ich, die vorliegende Doktorarbeit unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. C. Tropea und PD Dr.-Ing. I. V. Roisman nur mit den angegebenen Hilfsmitteln selbstständig angefertigt zu haben. Ich habe bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen.

Regine Mantel geb. Gramlich

Stuttgart im April 2017

Regine Mantel geb. Gramlich

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion im Zentralbereich Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH an den Standorten Gerlingen-Schillerhöhe und Renningen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea und Herrn PD Dr.-habil Ilia V. Roisman für die Betreuung der Arbeit und die zahlreichen Anregungen, die dazu beigetragen haben, dass die Arbeit zu dem geworden ist, was sie heute ist. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing danke ich für das Interesse an der Arbeit und die freundliche Übernahme des Koreferates. Des Weiteren möchte ich all meinen Kollegen aus dem Team der Gemischbildung danken, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Ein riesengroßes Dankeschön gebührt Dr. Philippe Leick, der die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit seitens Bosch übernommen und mit seinem Wissen und seiner Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Außerdem gelten ein großes Lob und besonderer Dank Martin Noack, Ralf Köhler, Bernd Hüttl und Andreas Herzig, die mit ihren Fähigkeiten, fachlichen Hinweisen, guten Ratschlägen und immer wieder aufmunternden Worten einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Meinen Mitdoktoranden danke ich für das angenehme Arbeitsklima, die unterhaltsamen Kaffeepausen und vielen Diskussionen, besonders Wolfgang Friedrich und Jan Geiler, die die Arbeit auch Korrektur gelesen haben. Des Weiteren danke ich Jakub Kaleta und Alina Miller für das Anfertigen ihrer experimentellen Abschlussarbeiten zum Thema der interagierenden Sprays. Magnus Ernst danke ich für die Möglichkeit in Schwieberdingen Phasen-Doppler-Messungen durchzuführen zu können sowie für die Unterstützung bei der Auswertung. Seitens der Dieseluntersuchungen danke ich Dr. Birgit Lenz und dem Team der Düsenentwicklung insbesondere für die Bereitstellung der Düsenmuster.

Abseits der Arbeit danke ich Moritz, meiner Familie sowie meinen Freunden nah und fern für die Unterstützung, den starken Rückhalt und die nötige Ablenkung während des Studiums und der Promotion.

Danke!

Kurzzusammenfassung

Über die Interaktion fast paralleler sowie kollidierender Kraftstoffsprays

Die Zerstäubung des eingespritzten Kraftstoffs ist sowohl in Otto- als auch in Dieselmotoren ein maßgeblicher Faktor einer effizienten und sauberen Verbrennung. Zur Optimierung wurde in der Vergangenheit auf unterschiedlichste Zerstäubungsmechanismen gesetzt. Heutzutage dominiert jedoch die einfache Druckzerstäubung, deren Entwicklung in den letzten Jahren in Richtung immer höherer Einspritzdrücke ging. In dieser Arbeit werden zwei neuartige Einspritzkonzepte untersucht, die auf einer bewusst herbeigeführten Interaktion einzelner Sprays beruhen. In beiden Konzepten soll letztendlich die Interaktion einzelner Sprays eine verbesserte Zerstäubung sicherstellen. Indirekte Merkmale hierfür sind u.a. eine schnellere Verdampfung und ein erhöhtes Ansaugen umgebender Luft. Die für die Interaktion der Sprays relevanten Wirkzusammenhänge werden vorwiegend mit Hilfe optischer Messtechniken untersucht. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei dem nahe am Injektor gelegenen Interaktions- bzw. Kollisionsbereich gewidmet. Um eine gute optische Zugänglichkeit zu garantieren, werden für beide Konzepte Düsenmuster mit reduzierter Lochanzahl verwendet.

Für das Dieselspray werden einzelne Spritzlöcher durch Paare aus zwei kleineren, fast parallel ausgerichteten Löchern ersetzt, wobei der hydraulische Durchfluss des Injektors konstant gehalten wird. Primäres Ziel ist es, die Vorteile kleiner Löcher für die Zerstäubung bei Teillast auszunutzen, ohne deren Nachteil bei Volllast in Kauf nehmen zu müssen. Bei ausreichend großer Einspritzmenge soll die Vereinigung der beiden Sprays die gewünschte schnelle Penetration in den Brennraum sicherstellen. Im Vergleich zu konventionellen Dieselsprays mit gleichem hydraulischem Durchfluss sind für die „gruppierten“ Düsen kaum Unterschiede festzustellen. Die makroskopischen Strahlgrößen wie Luftansaugung und Verdampfung entsprechen denen der Referenzdüse. Detaillierte Untersuchungen bringen jedoch bereits vor der Interaktion Unterschiede im Kegelwinkel und in der Stabilität zwischen den beiden gruppierten Einzelsprays zum Vorschein. Diese Differenzen sind allerdings auf die Zuströmung von Kraftstoff in die einzelnen Spritzlöcher und nicht auf Interaktion der Sprays zurückzuführen. Überraschenderweise scheint das gruppierte Spray insgesamt stabiler als das Referenzspray zu sein und es lassen sich signifikante Unterschiede in der Impulsverteilung der beiden Einzelsprays vor der Interaktion finden. Ob diese Unterschiede jedoch generelle Eigenschaften gruppierten Sprays oder aber auf die Besonderheiten des verwendeten Musters zurückzuführen sind, kann nur durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Bei den Benzinsprays werden die einzelnen Spritzlöcher ebenfalls durch je ein Paar kleinerer Löcher ersetzt. Die Sprays werden allerdings unmittelbar nach Düsenaustritt unter einem Winkel von 30° bzw. 40° zur Kollision gebracht, wodurch sich die Zerstäubungsgüte verbessern soll. Das Druckniveau soll so gesenkt werden, um Kosten zu sparen und Ansprüche an das Material zu

reduzieren. Durch die Kollision von zwei Einzelstrahlen in kurzem Abstand zur Düsen Spitze entsteht eine instabile, schnell zerfallende Flüssigkeitslamelle. Die Untersuchungen zeigen, dass das sogenannte „Twinjetspray“ gegenüber Benzinreferenzsprays eine deutlich stärkere Luftströmung induziert und bei Einspritzung in eine heiße Atmosphäre auch schneller verdampft. Der erhoffte Effekt einer zu kleineren Durchmessern verschobenen Tröpfchengrößenverteilung bleibt hingegen größtenteils aus. Durch die andere räumliche Verteilung und die hinzugekommenen Freiheitsgrade können Twinjetsprays aber Vorteile in der Auslegung der Einspritzventile bieten. Die Hauptthese, dass durch die Zerstäubung durch Kollision kleinere Tröpfchen entstehen, kann nicht bestätigt werden. Es werden aber in beiden untersuchten Konzepten andere vorteilhafte Eigenschaften registriert, sodass die Konzepte weiter verfolgt werden sollten. Nach den erfolgten grundlegenden Untersuchungen sind nun einerseits Motorversuche erforderlich, andererseits die robuste Integration der Konzepte in Serieninjektoren. Dies ist für die Dieselvariante deutlich einfacher zu realisieren, da das Konzept grundlegend weniger von der bewährten Einspritztechnik abweicht.

Abstract

Towards an understanding of possible modes in interactions between fuel sprays

The quality of atomization is decisive for an effective and clean combustion. To meet stringent emission legislation and reduce fuel consumption a complete mixture formation is required. Interacting sprays are one possibility to atomize fuel into fine droplets. New concepts are used to improve the atomization quality. New designs of the injector holes for gasoline and Diesel injectors are investigated in this work.

For Diesel injectors one individual larger spray hole is replaced with a pair of closely spaced, nearly parallel but smaller “grouped holes”. The resulting spray properties strongly depend on the interaction and eventual merging of individual jets. The goal is to use the advantageous small diameters under low and part load conditions due to improved atomization and faster evaporation of the injected fuel. In contrast, nozzles with larger diameters are needed at full load in order to rapidly inject larger quantities of fuel. Due to the larger number of smaller holes and slipstream effects, a sufficient amount of fuel can be injected and mixed with air in a very short amount of time. Comparing the grouped hole Diesel nozzle to a conventional nozzle with the same hydraulic flow rate reveals only very subtle differences. The macroscopic features such as the spray-induced air entrainment and the evaporation behavior, are very similar. Surprisingly, the momentum distribution of the two sprays that make up a group is highly asymmetric. The group hole sprays also appears to be more stable than the high flow-rate reference, but this difference might not be generalizable and could be a peculiarity of the investigated nozzles.

The near-nozzle collision of two cylindrical jets generates an unstable elliptical sheet which rapidly disintegrates into fine droplets. The velocity of the twinjet sprays is found to be within the range expected according to conservation of momentum in droplet collisions; the velocity is thus slightly lower than for a comparable reference nozzle. The measured air entrainment velocities are significantly higher for twinjet sprays than for a reference nozzle with the same flow rate, which suggests improved atomization. Using the twinjet sprays, roughly twice the amount of fuel can be evaporated within the same time.

The direct measurement of the droplet size distribution of the twinjet and reference sprays via the phase Doppler technique shows a very similar drop size distribution. However, the different spatial distribution of the twinjet spray and the additional degrees of freedom might be advantageous for the design and optimization of gasoline direct injection systems. The main hypothesis that smaller droplets can originate from twinjet atomization is not confirmed. Nevertheless, both investigated concepts show advantageous properties, so that, follow-up research and development is justifiable and recommended. After investigating the fundamentals of the concepts, engine investigations

and the robust integration in serial injectors are required. This is easier for the Diesel injectors, as the concept is closer to proven injection technologies.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	iii
Abstract	v
Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen der Zerstäubung	6
2.1 Zerfallsmechanismen	7
2.2 Wechselwirkung zwischen Gas und Tröpfchen	11
2.3 Aientrainment	13
2.4 Verdampfung und Gemischbildung	15
2.5 Motorrelevante Charakterisierung der Sprays in der Direkteinspritzung	16
2.5.1 Dieselspray	16
2.5.2 Benzinspray	18
2.6 Interagierende Sprays	19
2.6.1 Interaktion fast paralleler Sprays	20
2.6.2 Kollision von Sprays	22
3 Experimenteller Aufbau und Messtechnik	27
3.1 Injektorsysteme und Düsen	27
3.1.1 Diesel - gruppierte Lochdüse	27
3.1.2 Benzin - Twinjetdüse	30
3.2 Messtechniken	31
3.2.1 Photographische Methoden	33
3.2.2 Laser-Doppler-Technik	42
3.2.3 Sensorbasierte Messverfahren	44
3.3 Druckkammern	45
3.3.1 Photokammer (Diesel)	45
3.3.2 Brennkammer	46
3.3.3 Strahlkraft	49
3.3.4 Benzinkammer bei Raumtemperatur	51
3.3.5 Beheizte Benzinkammer	52
3.3.6 Phasen-Doppler-Kammer	52

4	Interagierende Sprays I - fast parallele Sprays	56
4.1	Motivation, Beschreibung, Stand der Forschung	56
4.2	Durchfluss der Düsen	59
4.3	Geometrische Charakterisierung	61
4.4	Verdampfungsverhalten	63
4.4.1	Flüssigkeitsreichweite	64
4.4.2	Fluktuationen	70
4.4.3	Spraybild im Nahbereich	72
4.4.4	Verdampfungsverhalten in der Gesamtbetrachtung	74
4.5	Sprayimpuls	74
4.5.1	Impulsprofile	74
4.5.2	Zeitlicher Strahlkraftverlauf	80
4.5.3	Strahlkraftmessungen in der Gesamtbetrachtung	81
4.6	Airentainment	81
4.6.1	Zeitlicher Airentainmentverlauf	84
4.6.2	Vergleich des Entrainments für verschiedene Düsen	85
4.6.3	Entrainment in der Gesamtbetrachtung	90
4.7	Zusammenfassung und Fazit	90
5	Interagierende Sprays II - kollidierende Sprays	93
5.1	Motivation, Beschreibung, Stand der Forschung	93
5.2	Durchfluss der Düsen	95
5.3	Geometrische Charakterisierung	97
5.4	Spraygeschwindigkeit	100
5.5	Verdampfungsverhalten	102
5.5.1	Flüssigkeitsreichweite	103
5.5.2	Kegelwinkel	105
5.5.3	Verdampfungsdauer	106
5.5.4	Verdampfungsverhalten in der Gesamtbetrachtung	107
5.6	Airentainment	108
5.6.1	Zeitlicher Airentainmentverlauf	108
5.6.2	Druckabhängigkeit des Airentainments	109
5.6.3	Vergleich des Entrainments für verschiedenen Düsen	110
5.6.4	Airentainment in der Gesamtbetrachtung	114
5.7	Tröpfchengrößenverteilung	115
5.7.1	Konturplots	116
5.7.2	Profil entlang der Ellipsenachsen	118
5.7.3	Zeitlicher Verlauf	119
5.7.4	Gemittelte Tröpfchengrößenverteilung	124
5.7.5	Korrelation	127
5.7.6	Tröpfchengrößenverteilung in der Gesamtbetrachtung	127
5.8	Zusammenfassung und Fazit	128
6	Zusammenfassung und Ausblick	131
6.1	Zusammenfassung	131
6.2	Ausblick	134
	Literaturverzeichnis	136

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

a	m	Höhe der Schlierenblende
Δa	m	Verschiebung des Lichtstrahls
A_f	m ²	Kontrollfläche
A_L	m ²	Spritzlochfläche
c_v	-	Geschwindigkeitskoeffizient
c_D	-	Durchflussbeiwert
d	m	Durchmesser
d_L	m	Spritzlochdurchmesser
d_P	m	Partikeldurchmesser
d_0	m	Anfangsdurchmesser
d_{10}	m	arithmetisch gemittelter Partikeldurchmesser
d_{20}	m	Partikeldurchmesser – Oberfläche
d_{30}	m	Partikeldurchmesser – Volumen
d_{32}	m	Sauterdurchmesser
f	m	Brennweite
F	N	Kraft
F_L	m	Flüssigkeitsreichweite
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
I	counts	Helligkeit eines Pixel
K	m ³ /kg	Gladstone-Dale-Konstante
l	m	Länge des Spritzlochs
L_S	m	Penetration
m_f	kg	Masse der Flüssigkeit
\dot{m}_f	m ³ /s	Massenstrom der Flüssigkeit
\dot{m}_g	m ³ /s	Entrainmentmassenstrom
n	-	Brechungsindex
N_x	-	Anzahl der Interrogationsfenster in x -Richtung
N_y	-	Anzahl der Interrogationsfenster in y -Richtung
$N(z)$	-	Konzentration der Streuzentren
P	W	Leistung
p	kg m/s	Impuls
p_E	bar	Einspritzdruck
p_g	bar	Gegendruck
q	-	Wellenlängenbezogener Partikeldurchmesser (Mie-Theorie)

r	mm	Abstand von Injektorachse
u_B	m/s	Bernoulli-Geschwindigkeit
u_f	m/s	Geschwindigkeit der Flüssigkeit
u_g	m/s	Geschwindigkeit des umgebenden Gases
\vec{u}_i	m/s	Geschwindigkeitsvektor
u_p	m/s	Geschwindigkeit des p-ten Partikels
$v_{1,2,3}$	m/s	Geschwindigkeit des Gasjets
t	s	Zeit
t_A	s	Ansteuerzeit
t_{ASOI}	s	Zeit nach Einspritzung
t_{ASOE}	s	Zeit nach Bestromungsbeginn
t_b	s	Aufbruchzeitpunkt
Δt	s	Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern einer PIV-Messung
T_g	K	Gastemperatur in der Kammer
T_f	K	Temperatur der Flüssigkeit
x	m	x -Koordinate
Δx	m	Verschiebung
y	m	y -Koordinate
z	m	z -Koordinate

Griechische Symbole

α	°	Kegelwinkel eines Einzelsprays
α_l	°	Ablenkungswinkel eines Lichtstrahls
β	°	Gesamtkegelwinkel eines Sprays
β_v	-	Verdampfungskoeffizient
η_f	Pa s	Dynamische Viskosität des Kraftstoffs
η_i	-	Gewichtungsfaktor
λ	nm	Wellenlänge
ψ	°	Neigung der Sprayachse
ψ	°	Seitenwinkel
ϕ	°	Höhenwinkel
ρ_f	kg/m ³	Dichte des Flüssigkeit
ρ_P	kg/m ³	Partikeldichte
ρ_g	kg/m ³	Gasdichte
σ_f	kg/s ²	Oberflächenspannung
$\sigma(z)$	m ²	Wirkungsquerschnitt
θ	°	Kollisionswinkel der Sprays
τ	-	optische Dichte

Abkürzungen

ASOE	After Start of Energization
ASOI	After Start of Injection
BDE	Benzindirekteinspritzung
CCD	Charge Coupled Device
CNG	Compressed Natural Gas
DPSS	Diode Pumped Solid State

FWHM	Full Width Half Maximum (Halbwertsbreite)
FPIV	Fluorescent Particle Image Velocimetry
GH	Group-Hole
HDEV	Hochdruckeinspritzventil
LCV	Laser Correlation Velocimetry
LD	Laser Doppler
LDM	Long Distance Microscope
OPS	optisch gepumpter Halbleiter
PD	Phasen Doppler
PIV	Particle Image Velocimetry
SH	Single-Hole

dimensionslose Kennzahlen

Oh	Ohnesorge-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
We	Weber-Zahl

Einleitung

1.1 Motivation

Angesichts einer immer strenger werdenden Abgasgesetzgebung und der Konkurrenz durch elektrische Antriebskonzepte ist ein tiefergehendes Verständnis des verbrennungsmotorischen Prozesses wichtig, um den bereits weit entwickelten Verbrennungsmotor über den heutigen Stand hinaus optimieren zu können. Eine wesentliche Rolle für die Schadstoffreduzierung und einen geringen Verbrauch bei Verbrennungsmotoren mit Direkteinspritzung spielt die Gemischbildung. Obwohl je nach Anwendungsbereich [13]

- Benzin - Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch,
- Benzin - Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch
- Benzin - Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch und kontrollierter Selbstzündung, kompressionsgezündet
- Diesel - Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch und teilweise diffusionskontrollierter Verbrennung

unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen, können die Anforderungen an die Direkteinspritzung mit anschließender homogener Verbrennung folgendermaßen zusammengefasst werden: Gasförmiger (CNG) oder flüssiger (Benzin, Diesel) Kraftstoff, der direkt während des Ansaugtaktes oder in den mit komprimierten Gas gefüllten Brennraum eingespritzt wird, muss in diesem möglichst schnell gut zerstäubt, verteilt und verdampft werden, sodass ein mehr oder weniger homogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch entsteht, das so effizient und schadstoffarm wie möglich (dies kann wie zum Beispiel bei Stickoxiden (NO_x) einen Zielkonflikt darstellen) verbrannt wird. Beim Ottomotor wird vor allem die Direkteinspritzung genutzt, da sich so eine Verbrauchsreduktion erzielen lässt. Im Dieselmotor ist die Direkteinspritzung notwendig um das Drehmoment und die Leistung zu erhöhen [13] und ein saubereres Abgas zu erzeugen sowie den Verbrauch zu senken. Bei der Direkteinspritzung sollen im Brennraum nicht nur homogene Verbrennungsprozesse ablaufen. Bei der Dieselerverbrennung und im BDE-Schichtbetrieb ist eine inhomogene Verteilung des Kraftstoffs im Brennraum erwünscht. Die homogene Verbrennung ist partikelfrei, falls $\lambda > \text{ca. } 0,7 - 0,9$. Bei der homogen stöchiometrischen Verbrennung kann eine einfache Abgasnachbehandlung über den 3-Wege-Kat erfolgen. Bei der Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch sind die Wandwärmeverluste durch eine isolierende Luftschicht zwischen Verbrennungszone und Wand reduziert (strahlgeführte BDE). Außerdem sind bei geschichtetem Verfahren weniger (BDE) oder gar keine (Diesel) Drosselverluste bei der Ansaugung zu verzeichnen. Beim Diesel ermöglicht das geschichtete Verfahren höhere Kompressionen ohne Klopfen.

Um diese schadstoffarme und effiziente Verbrennung zu erreichen, werden immer wieder neue technische Kniffe angewandt. Die Effizienzsteigerung der Verbrennung ist seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung. Durch innovative Ansätze wird immer wieder versucht, die grundlegenden Wirkzusammenhänge besser zu verstehen und die an dem Prozess beteiligten Komponenten weiter zu verbessern. Schadstoffbildung und Verbrauch werden sowohl beim Diesel- als auch beim Benzinmotor maßgeblich durch die Gemischbildung im Brennraum beeinflusst. Der Verbrennungsprozess im Dieselmotor zeichnet sich im Vergleich zu dem im Ottomotor durch einen höheren Wirkungsgrad aus, allerdings emittiert er zum Teil auch mehr Stickoxide und Ruß. Manche Varianten der Benzindirekteinspritzung (BDE) (z.B. bei magerer Verbrennung) führen wie die Dieselvebrennung zu einer verstärkten Entstehung von NO_x . Außerdem resultiert aus der Anwendung der BDE ohne Partikelfilter mehr Ruß als bei der Dieseldirekteinspritzung mit Filter, prinzipiell entstehen bei der BDE mehr HC und CO. Dies ist vor allem eine Folge der stöchiometrischen Betriebsweise, die heute häufig angewandt wird. Es fehlt das O_2 um Reste an HC/CO weiter zu oxidieren.

Die tiefgreifende Untersuchung des komplexen Vorgangs der Zerstäubung und der Gemischbildung ist für den Verständnisaufbau dieser Prozesse [58] entscheidend. Sobald der flüssige Kraftstoff die Düse verlässt, entstehen Störungen an der Strahloberfläche, die durch aerodynamische Kräfte weiter verstärkt werden. Dies gilt vor allem für die Dieseleinspritzung. Durch die andere Lochgeometrie den Benzindüsen wird ein schnelleres Zerstäuben unterstützt. Die so entstehenden Ligamente und Tröpfchen zerfallen durch die hohe Relativgeschwindigkeit zu noch kleineren stabilen Tröpfchen, die aufgrund der hohen Tröpfchendichte in ständiger Interaktion mit sich und der umgebenden Luft stehen. Die Flüssigkeitszerstäubung setzt sich aus Primär- und Sekundärzerfall zusammen. Aufgrund des hohen Einspritzdrucks breitet sich der Kraftstoff schnell im Raum aus und zerfällt in einen feinen Tröpfchennebel, der unter innermotorischen Bedingungen schnell verdampft.

Beim Dieselmotor wird Kraftstoff im Bereich des oberen Totpunkts in die hochverdichtete Luft des Brennraums eingespritzt. Vor allem unter Volllast ist es hier entscheidend, eine hohe Eindringtiefe des Dieselkraftstoffs in den Brennraum zu erreichen, um den Kraftstoff in kürzester Zeit zu verteilen. Um die Zerstäubung insbesondere bei kleinen Einspritzmengen zu verbessern, werden die Spritzlöcher immer kleiner ausgelegt. Dies steht jedoch im Widerspruch zu der für die Volllast notwendigen, tiefen Penetration des Dieselkraftstoffs in den Brennraum.

Um eine schnellere und bessere Zerstäubung und somit eine höhere Güte der Gemischbildung zu erreichen, wird auch bei Ottomotoren der Einspritzdruck stetig erhöht. Außerdem kann auch hier bei Volllast mehr Menge in der Motor eingebracht werden. Der Haupttreiber für die Erhöhung des Drucks ist nicht hauptsächlich die Homogenisierung, sondern das Vermeiden von Ruß aufgrund benetzter Oberflächen an Injektorspitze und Brennraumwand. In der aktuellen Entwicklung werden Einspritzdrücke bis $p_E = 350$ bar erreicht. Um Partikelentstehung zu vermeiden, ist beim Ottomotor wegen der deutlich geringeren Gasdichte im Brennraum eine niedrige Penetration wünschenswert, da so eine Benetzung der Brennraumwand und des Kolbens, die zu Partikelentstehung führen kann [99], vermieden wird. Die Ventilbenetzung und die Selbstbenetzung des Injektors hängen nicht alleine von der Penetration ab und müssen daher durch weitere, davon unabhängige Maßnahmen vermieden bzw. minimiert werden.

Der Trend hin zu immer höheren Einspritzdrücken ist kostspielig, da zum einen mehr Energie benötigt wird, um den hohen Druck bereit zu stellen und zum anderen der Anspruch an das Material und die Fertigung größer wird, da der Injektor im Betrieb deutlich höheren Einspritzdrücken standhalten muss. Um Kosten zu senken und trotzdem eine mindestens gleich gute Gemischaufbereitung zu erzielen, ist das Interesse an neuen Zerstäubungstechnologien sehr hoch.

Zwei dieser Konzepte, je eines für den Diesel- und für den Ottomotor, werden in dieser Arbeit betrachtet und die Auswirkung auf die Zerstäubung und Gemischbildung untersucht. Die Arbeit soll zu einem besseren Verständnis der Zerstäubung durch neuartige, bewusst zur Interaktion gebrachten Kraftstoffsprays beitragen und Aufschluss geben, ob diese Konzepte Vorteile gegenüber dem Stand der Technik aufweisen. Der mögliche Vorteil der Interaktion bei der Zerstäubung von Kraftstoffsprays wird sowohl für die Anwendung bei Benzin- als auch bei Dieselsprays betrachtet. Der Interaktion der Dieselsprays liegt die Idee zugrunde, die Spritzlöcher für eine feinere Zerstäubung, vor allem für die Anwendung bei Teillast, zu verkleinern. Dies soll durch die Interaktion zweier nah beieinander liegender Sprays realisiert werden, die die Penetration und somit die Verteilung im Brennraum erhöhen und es ermöglichen, ausreichend viel Kraftstoff während der Volllast in den kompletten Brennraum einzubringen und schnell mit Luft zu vermischen. Bei der im Benzinbereich angewandten Kollision zweier Einzelsprays im Nahbereich der Düse soll die These überprüft werden, ob durch Anwendung des Konzepts kleinere Tröpfchen entstehen, die durch schnellere Verdampfung Vorteile bei der Gemischbildung aufweisen können, und ob durch ein kleineres Tröpfchenspektrum eine Druckabsenkung realisiert und damit Kosten eingespart werden können.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der Interaktion von Kraftstoffsprays, sowohl im Diesel- als auch im Benzinbereich, mittels verschiedener Messtechniken und unter der Vorgabe unterschiedlicher Randbedingungen. Insbesondere wird der Düsennahbereich detaillierter betrachtet, da hier die größten Unterschiede zwischen den interagierenden und konventionellen Sprays erwartet werden. Das physikalische Verständnis der Zerstäubung, der Verdampfung und der Gemischbildung bei interagierenden Einzelsprays soll aufgebaut werden. So können interagierende Sprays sowohl im Diesel- als auch im Benzinmotor eingesetzt werden, indem die Interaktion auf die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Gemischbildung angepasst wird. Ein Vergleich mit konventionellen Einspritzdüsen gibt Aufschluss darüber, inwieweit die Zerstäubung, Verdampfung und Gemischbildung durch die Interaktion von Sprays verbessert werden kann.

Zu Beginn der Arbeit wird auf die Grundlagen der Zerstäubung eingegangen (Kapitel 2), da sie für das Verhalten von Sprays von wesentlicher Bedeutung sind. Anschließend werden erst die verwendeten Messtechniken im Allgemeinen, dann ihre spezifische Realisierungen im Rahmen dieser Arbeit dargestellt (Kapitel 3). In den Kapiteln 4 und 5 folgt eine Darstellung der Ergebnisse mit entsprechender Diskussion, die den Schwerpunkt der Arbeit bildet. In Kapitel 4 wird das Konzept der interagierenden fast parallelen Sprays und deren Anwendung im Dieselinjektor dargestellt. Kapitel 5 beinhaltet die Ergebnisse zur Untersuchung des zweiten Konzepts, der Kollision zweier Flüssigkeitsstrahlen, wie es für den Einsatz im Benzininjektor vorgeschlagen wurde. Das letzte Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse sowie einem Ausblick darüber, was nach der Untersuchung des Konzeptes der Interaktion von Kraftstoffsprays möglich ist, welches Potential die unterschiedlichen Konzepte aufweisen und welche weiteren Schritte für eine Realisierung im Motor notwendig sind.

In der Arbeit wird die Interaktion von Sprays näher betrachtet. Hierbei werden zwei Fälle genauer untersucht: Zum einen die Interaktion zweier fast paralleler Sprays (Kapitel 4), zum anderen die Kollision und die daraus folgende Prallzerstäubung zweier Sprays unter einem Kollisionswinkel von 30° bis 40° (Kapitel 5). Die Düsen mit der jeweiligen Anordnung der Spritzlöcher sind

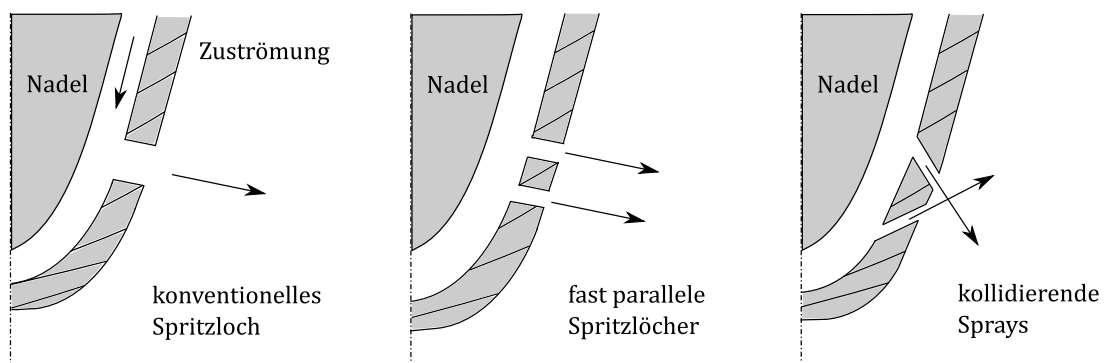


Abbildung 1.1: Skizze der unterschiedlichen Varianten zur Anordnung der Spritzlöcher, links das konventionelle Spritzloch, in der Mitte die beiden fast parallelen Spritzlöcher und rechts die aufeinander zugerichteten, kollidierenden Sprays

neben der konventionell verwendeten Düse mit der halben Spritzlochanzahl in Abbildung 1.1 schematisch gezeigt. Die jeweiligen Konzepte werden für unterschiedliche Anwendungen genutzt. Die Verschmelzung zweier Sprays (mittlere Abbildung) soll für das Dieselspray genutzt werden. Um die Vorteile bei Teillast nutzen zu können, wird ein großes Spritzloch durch zwei kleinere ersetzt. Kleinere Spritzlöcher haben den Vorteil, dass der Kraftstoff bei gleichem Einspritzdruck zu kleineren Tröpfchen zerstäubt wird und sich dadurch besser mit der Luft durchmischt, was den Verbrennungsvorgang begünstigt. Um den gleichen Massendurchsatz zu erreichen und somit auch bei Volllast ausreichend Kraftstoff im Brennraum zu verteilen, muss die Spritzlochanzahl erhöht werden. Eine einfache Erhöhung der Spritzlochanzahl beeinflusst die Penetration des Sprays nicht wesentlich. Der Nachteil der verkürzten Penetration durch das Verkleinern der Spritzlöcher soll durch die aus der Interaktion der beiden Einzelsprays möglicherweise resultierenden Erhöhung der Reichweite kompensiert werden.

Das Konzept der Kollision (rechte Abbildung) soll für die Anwendung bei Benzinsprays genutzt werden. Mit Hilfe der Kollision wird der Impuls des Sprays in Bewegungsrichtung des Sprays vermindert, sodass die Penetration des Sprays in Folge der zusätzlich zur Druckzerstäubung wirkenden Prallzerstäubung verringert wird. Die verminderte Penetration verringert Probleme in Folge von Wand- und Kolbenbenetzung. Mittels Prallzerstäubung sollen bei gleichem Einspritzdruck kleinere Tröpfchen entstehen als dies durch die konventionelle Druckzerstäubung möglich ist. Durch Anwendung des Konzepts der Kollision zweier Freistrahlen wird erwartet, dass das erforderliche Druckniveau der Einspritzung zur Zerstäubung auf ein niedrigeres Druckniveau gebracht werden kann. Die Kollision eröffnet zudem zusätzliche Freiheitsgrade, das Spray im Raum zu verteilen.

Ziel der Arbeit ist es, Verständnis für die Interaktionsmechanismen aufzubauen. Dieses Ziel unterscheidet sich fundamental von einer motorischen Bewertung des Konzepts, in der zwar Vor- und Nachteile deutlich aufgezeigt werden können, aber eine diesbezügliche Ursachenforschung schwierig wäre. Aufgrund dessen werden die Injektoren an stationären Kammern und nicht am Motor untersucht. An den Kammern ist eine Untersuchung der Interaktionsmechanismen deutlich detaillierter und genauer möglich. Die Kernhypothesen, die vorausgehend vorgestellt wurden, sollen überprüft werden. Zum einen, ob eine erhöhte Penetration ohne Nachteile bei der Gemischbildung durch annähernd parallele *gruppierte* Sprays möglich ist, zum anderen ob durch die Kollision zweier Flüssigkeitsstrahlen kleinere Tröpfchen entstehen. Es geht in dieser Phase nicht darum, die unvermeidlich entstehenden Probleme bei der konkreten Realisierung zu lösen oder

die beiden Konzepte im Hinblick auf einen bestimmten Motor zu optimieren. Die Untersuchungen erfolgen zwar in dieser Arbeit ausschließlich mittels experimenteller und nicht mittels numerischer Methoden, die Ergebnisse sollten aber für eine Anpassung numerischer Methoden auf die spezielle Anwendung interagierender Sprays von großem Wert sein.

Zur Durchführung der Experimente stehen verschiedene Druckkammern mit hoher optischer Zugänglichkeit zur Verfügung, in denen Einspritzungen in ruhende, stationäre Atmosphäre untersucht werden können. Die grundlegenden Messungen werden für bessere optische Zugänglichkeit bei Raumtemperatur durchgeführt. Um die Verdampfung der Sprays abbilden zu können, werden zusätzlich Messungen in Kammern realisiert, die hinsichtlich der Temperaturen und vorherrschenden Gasdichten motorähnliche Bedingungen aufweisen.

Grundlagen der Zerstäubung

In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Mechanismen des Strahlzerfalls von Kraftstoffsprays beschrieben. Im Anschluss wird auf die Besonderheiten von Diesel- beziehungsweise Benzinsprays und auf die für die Charakterisierung derselbigen genutzten Kenngrößen eingegangen. Abschließend werden die unterschiedlichen Arten der Interaktion von Sprays zu einer verbesserten Zerstäubung, Gemischbildung und Verdampfung im Brennraum betrachtet. Auf die Verbrennung wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da die Interaktion zweier Kraftstoffsprays zunächst mit grundlegenden Untersuchungen charakterisiert werden soll.

Um Kraftstoff effizient nutzen zu können, kann dieser als Spray direkt in den Motorraum eingespritzt werden. Die zunächst noch zusammenhängende Kraftstoffflüssigkeit wird in eine Wolke aus kleinen Tröpfchen zerstäubt, die sich bevorzugt möglichst gleichmäßig im Motorraum verteilen soll [13]. Um diese möglichst fein zu zerstäuben, muss der stabilisierende Einfluss der Oberflächenspannung der Flüssigkeit überwunden werden. Durch die Druckzerstäubung in kleine Tröpfchen kann eine gute Durchmischung mit der Luft, die den für die Verbrennung benötigten Sauerstoff enthält, gewährleistet werden.

Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die bei der Zerstäubung eines Kraftstoffsprays stattfindenden Prozesse. Dem Primärzerfall direkt an der Düse, der durch die Innenströmung beeinflusst wird, folgt der Sekundärzerfall und anschließend durch die Vermischung mit heißer einströmender, umgebender Luft die Verdampfung der Tröpfchen. Bei homogen-stöchiometrischen Brennverfahren mit Benzindirekteinspritzung wird der Kraftstoff häufig bereits während des Ansaugtaktes eingespritzt. Die Verdampfung resultiert dann vorwiegend aus der kompressionsbedingten Erwärmung eines bereits weitestgehend homogenen Luft-Tröpfchen-Dampf-Gemisches. Anschließend erfolgt die Verbrennung des Gemisches, die jedoch mit dem Prozess der Zerstäubung nichts mehr zu tun haben sollte. Die Qualität der Zerstäubung hat jedoch indirekt über die Gemischbildung Einfluss auf die Verbrennung, deren Effizienz und die entstehenden Emissionen. Die Beschreibung der Zerstäubung ist phänomenologisch. In Abbildung 2.1 sind die Phänomene dargestellt, die an einem *einzelnen* Kraftstoffspray auftreten. Um das physikalische Verständnis zur Interaktion von Sprays zu erlangen, werden Zerstäubung, Verdampfung und Gemischbildung der Sprays betrachtet. Auf eine Untersuchung der Verbrennung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da zunächst ein Überblick über die grundlegenden Prozesse der Zerstäubung und Gemischbildung von *interagierenden Sprays* geschaffen wird.

Die primäre Flüssigkeitszerstäubung kann nach Meier *et al.* [67] in drei Kategorien unterteilt werden. Es kann zwischen dem mechanischen Primärzerfall, aus dem ein freier Jet resultiert, dem aerodynamischen Primärzerfall, zum Beispiel durch die Nutzung eines koaxialen Gasjets, und dem Primärzerfall durch Aufprall unterschieden werden. Bei Letzterem treffen zwei flüssige Jets

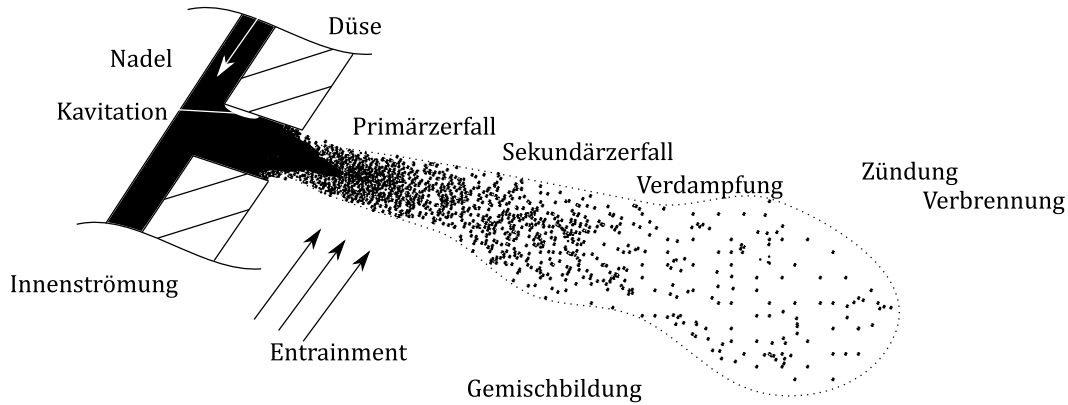


Abbildung 2.1: Skizze der Prozesse, die während einer Kraftstoffeinspritzung stattfinden. Inhaltlich sind hier sowohl Prozesse aus der Benzin- als auch Dieseleinspritzung dargestellt. Zündung und Verbrennung sind Prozesse, die örtlich stattfinden.

aufeinander oder einer trifft auf eine Wand. Im Bereich dieser Arbeit wird der Primärzerfall durch Aufprall sowie der mechanische Primärzerfall genutzt, um die Zerstäubung des Kraftstoffs zu unterstützen.

2.1 Zerfallsmechanismen

Zerfallsmechanismen dienen dazu, den normalen rein druck-getriebenen Strahlzerfall zu charakterisieren. Ausgehend von dieser Grundlage entstehen zahlreiche Varianten. Der Strahlzerfall einer Flüssigkeit ist von der Düsengeometrie, den Stoffdaten der Flüssigkeit und des Mediums, in das sie eingespritzt wird, sowie der Relativgeschwindigkeit zwischen diesen beiden Medien abhängig. Bei der Zerstäubung unterscheidet man den Primärzerfall, bei dem der Strahl in Ligamente und Tröpfchen zerfällt, und den Sekundärzerfall, bei dem diese Ligamente und Tröpfchen in noch kleinere stabile Tröpfchen zerfallen. Die Innenströmung hat Auswirkungen auf den Primärzerfall. Der Sekundärzerfall wird vor allem durch die Randbedingungen des umgebenden Gases bestimmt.

Die Zusammenhänge zwischen Einspritzparameter, Randbedingungen und den sich dadurch einstellenden Zerfallsmechanismen wurden erstmals von Ohnesorge [72] untersucht und dargestellt. Mittels dimensionsloser Kennzahlen kann die Zerstäubung charakterisiert werden. Der Zerfall einer Flüssigkeit lässt sich mit Hilfe der Flüssigkeits-Weberzahl

$$We_f = \frac{\rho_f u_f^2 d_L}{\sigma_f}, \quad (2.1)$$

die das Verhältnis von Trägheitskräften zu Oberflächenkräften beschreibt, und der Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{u_f d_L \rho_f}{\eta_f}, \quad (2.2)$$

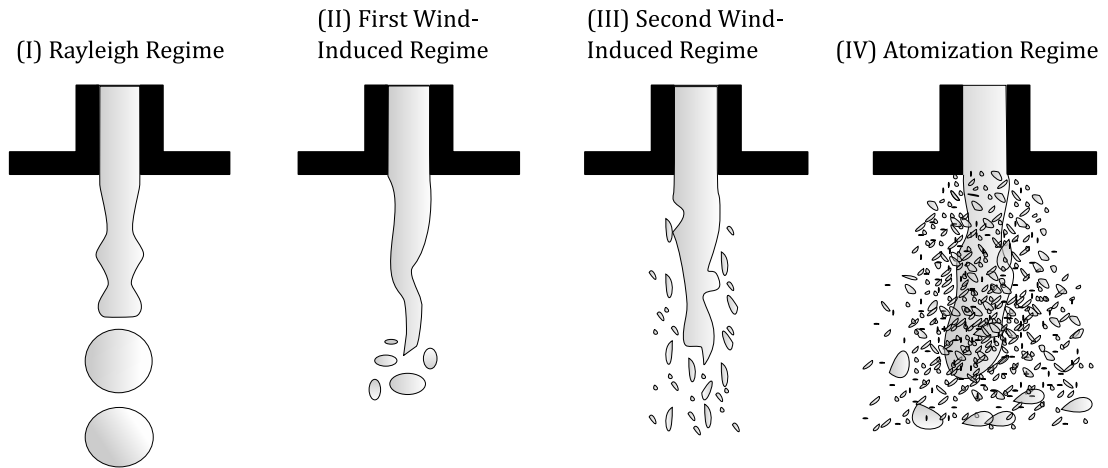


Abbildung 2.2: schematische Darstellung der vier verschiedenen Strahlzerfallsregimes: (I) Rayleigh Regime, (II) First Wind-Induced Regime, (III) Second Wind-Induced Regime, (IV) Atomization Regime, nach [87]

die aus dem Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften einer Flüssigkeit gebildet wird, charakterisieren. Die Stoffdaten der Flüssigkeiten sind in der Ohnesorge-Zahl

$$Oh = \frac{\sqrt{We_f}}{Re} = \frac{\eta_f}{\sqrt{\sigma_f \rho_f d_L}} \quad (2.3)$$

der Flüssigkeit zusammengefasst. Sie stellt die relative Bedeutung zwischen Zähigkeits- und Oberflächenkräften dar.

Primärzerfall Der durch interne, disruptive Kräfte verursachte Primärzerfall ist vor allem direkt nach dem Austritt der Flüssigkeit aus dem Spritzloch zu beobachten. Sprays aus einer einfachen Lochdüse, wie sie auch bei Kraftstoffinjektoren eingesetzt werden, können nach Reitz und Bracco [87] in vier Primärzerfallsarten in Abhängigkeit der Weber-Zahl unterteilt werden. Im Bereich des Primärzerfalls dominiert die Düseninnenströmung den Strahlaufbruch. Die vier Regimes unterscheiden sich vor allem in der Größe der entstehenden Tröpfchen sowie im Abstand vom Düsenaustritt, in dem noch ein zusammenhängender Flüssigkeitskern existiert. In Abbildung 2.2 sind die verschiedenen Bereiche mit ansteigender Weberzahl dargestellt.

- **Rayleigh Regime** Der Rayleigh Zerfall entsteht durch die Plateau-Rayleigh-Instabilität [82, 85]. Er stellt den Zerfall bei sehr langsamer Anströmung dar. Bei $We_f \approx 0,4$ entstehen durch Kapillarkräfte an der Oberfläche der Flüssigkeit achsensymmetrische Schwingungen, die den Strahl schließlich in Tröpfchen zerfallen lassen, deren Durchmesser größer als der Strahldurchmesser sind ($d > d_L$). Mit steigender Geschwindigkeit der anströmenden Flüssigkeit u_f und somit auch ansteigender Weberzahl erhöht sich der Abstand zwischen Tröpfchenbildungsort und Düsenaustritt.
- **First Wind-Induced Regime** Bei erhöhter Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit u_f (We_f zwischen $We_f \approx 0,4$ und $We \approx 13$) werden die Schwingungen durch aerodynamische Kräfte verstärkt, sodass die intakte Strahllänge sinkt. Oberflächenkräfte führen wie im vorher betrachteten Regime zum Ablösen der Tröpfchen. Der Durchmesser der entstehenden Tröpfchen liegt in der gleichen Größenordnung wie der Durchmesser des Spritzlochs.

- **Second Wind-Induced Regime** Bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit und resultierenden Weberzahlen zwischen $We_f \approx 13$ und $We_f \approx 40$ verändert sich der Zerfall der Flüssigkeit. Die Tröpfchen lösen sich nicht mehr von der Spitze ab. Die Turbulenz der Strömung führt zu Instabilitäten, die den Strahl an der Seite aufbrechen lassen. Hierbei muss zwischen der Reichweite des zusammenhängenden Flüssigkeitskerns und dem Abstand, in dem die ersten Tröpfchen gebildet werden, unterschieden werden.
- **Atomization Regime** Ab einer gewissen Strömungsgeschwindigkeit u_f beginnt die Zerstäubung der Flüssigkeit unmittelbar am Düsenaustritt. Ab $We_f \approx 40$ ist die Zerstäubung so weit fortgeschritten, dass ein intakter Flüssigkeitskern nur unmittelbar in Nähe des Spritzlochs vorliegt. Die entstehenden Tröpfchen sind viel kleiner als der Durchmesser des Spritzlochs. Sie bilden eine dichte Tröpfchenwolke um den Flüssigkeitskern des Sprays. Inwieweit der flüssige Kern existiert und wie weit er sich ausbreitet, ist nach wie vor unklar. Kraftstoffeinspritzungen finden bei modernen Einspritzsystemen aufgrund der hohen Einspritzdrücke größtenteils im *Atomization Regime* statt.

Im Ohnesorge-Diagramm (Abbildung 2.3) [87] sind Oh und Re logarithmisch aufgetragen. Empirisch ermittelte Begrenzungen zeigen die verschiedenen Zerfallsbereiche an. Es wird allerdings weder der Einfluss der Düsengeometrie noch der Einfluss der Dichte ρ_g des umgebenden Gases auf den Flüssigkeitszerfall berücksichtigt. Durch Auftragung der Bereiche der Benzin- und der Dieseleinspritzung wird ersichtlich, dass die entstehenden Kraftstoffsprays fast ausschließlich dem *Atomization Regime* zugeordnet werden können. Die anderen Zerfallsbereiche spielen nur zu Beginn und Ende der Einspritzung oder bei niedrigeren, untypischen Einspritzdrücken ($p_E \ll 100$ bar) eine Rolle. Optische Untersuchungen vom Inneren der Kraftstoffsprays erweisen sich daher als besonders schwierig, da der Kernbereich des Sprays unmittelbar nach Verlassen des Spritzlochs von einer Tröpfchenwolke umgeben ist und sich das Spray mit hohen Geschwindigkeiten fortbewegt. Studien an Kraftstoffsprays beschränken sich daher auf die Charakterisierung makroskopischer Parameter sowie den Versuch, in größerer Entfernung vom Düsenaustritt auch mikroskopisch zum Beispiel die Tröpfchengröße oder -geschwindigkeit zu untersuchen.

Im *Atomization Regime* tragen die aerodynamischen Kräfte an der Oberfläche der eindringenden Flüssigkeit entscheidend zum Strahlaufbruch und zur Zerstäubung bei. Die Intensität der Wechselwirkung ist stark von der Oberfläche des Flüssigkeitsstrahls abhängig. Eine glatte Oberfläche hat weniger Störungen und somit auch weniger Angriffspunkte für die disruptiven aerodynamischen Kräfte. Durch Beeinträchtigung der Innenströmung durch Turbulenz und Kavitation werden der Strömung bereits unmittelbar nach Verlassen des Spritzlochs Störungen aufgeprägt. Vor allem die Dieseleinspritzung wird stark durch Kavitation und Turbulenzen beeinflusst. Kavitation im Spritzloch der Dieseleinspritzdüsen kann mittels Röntgenstrahlung abgebildet werden. Die entstehenden Ligamente und Tröpfchen können sich vom Strahl lösen und durch den Sekundärzerfall in weitere kleinere Tröpfchen zerfallen.

Die maximale Geschwindigkeit u_B des durch Zerstäubung entstehenden Sprays ergibt sich aus der Druckdifferenz zwischen Einspritzdruck p_E und Umgebungsdruck p_G nach dem Satz von Bernoulli zu

$$u_B = \sqrt{\frac{2(p_E - p_G)}{\rho_f}}, u < a \quad (2.4)$$

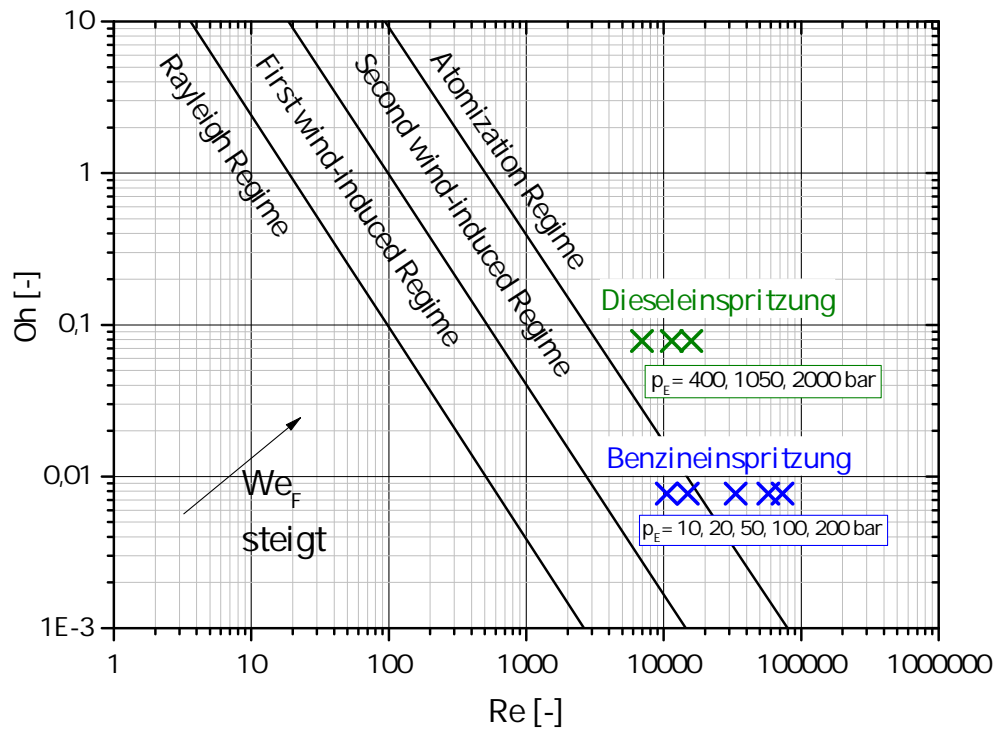


Abbildung 2.3: Ohnesorge-Diagramm. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die Übergänge zwischen den eingezeichneten Zerfallsbereichen. Die Dieseleinspritzung findet ausschließlich im *Atomization Regime* statt. Bei der Benzineinspritzung gibt es Betriebspunkte, die im *Second Wind-Induced Regime* liegen. Das sind jedoch für moderne Einspritzsysteme zu niedrige Einspritzdrücke. Die in dieser Arbeit hauptsächlich untersuchten Betriebspunkte sind mit einem x gekennzeichnet und darunter benannt. Nach [87].

während für den Massenstrom des Sprays \dot{m}_f durch die Kontrollfläche A_L die folgende Beziehung gilt

$$\dot{m}_f = \rho_f A_L u_f. \quad (2.5)$$

Der Aufbruch eines Flüssigkeitsstrahls ist neben der Weberzahl von weiteren Größen abhängig, die zum Teil in der Ohnesorge-Zahl zusammengefasst sind. Die Länge der intakten Strahloberfläche nimmt bei steigendem Gegendruck bis zu einer bestimmten Länge ab. Der flüssige Kern des Sprays ist in einer Umgebung mit erhöhtem Gegendruck stabiler. Die Turbulenzentwicklung im Spritzloch beeinflusst die Zerstäubung der Flüssigkeit, besonders wenn Kavitation eine Rolle spielt. Je höher der Grad der Turbulenz, desto stärker die Durchmischung mit dem umgebenden Gas. Wu *et al.* [112] zeigen, dass Tröpfchen entstehen, sobald die kinetische Energie der kleinsten Wirbel gerade so groß ist wie die Energie der Oberflächenspannung, die benötigt wird, um ein Tröpfchen dieser Größe zu formen. Starke Turbulenz im Spritzloch, die durch Kavitation hervorgerufen wird, hat einen signifikanten Beitrag zur Zerstörung des Flüssigkeitsstrahls [98, 97]. Die Viskosität der Flüssigkeit hat zusätzlich Einfluss auf das Zerstäubungsverhalten. Je höher die Viskosität der Flüssigkeit ist, desto später bricht der Flüssigkeitsstrahl auf. Instabilitäten

werden unterdrückt, sobald die Viskosität so stark ansteigt, dass sich ein laminarer Jet bildet. Die Wellenlänge zwischen den auf dem Jet auftretenden Instabilitäten wird größer und somit auch die Größe der resultierenden Tröpfchen. Bei sehr hohen Re -Zahlen wird nur der Sekundärzerfall durch die Viskosität der Flüssigkeit beeinflusst.

Im Falle hoher Geschwindigkeiten des flüssigen Jets gibt es im Vergleich zum laminaren Jet viele verschiedene Mechanismen, die den Zerstäubungsprozess beeinflussen. Das Verhältnis aus Spritzlochlänge zu Spritzlochdurchmesser l/d_L beeinflusst zusätzlich die Zerstäubung. McCarthy und Molloy [65] haben die Bedeutung des Verhältnisses für die Zerstäubung überprüft: Je geringer das Verhältnis, desto früher kann ein Aufbruch des Flüssigkeitsstrahls beobachtet werden.

Eine weitere Größe ist der Durchflussbeiwert des Spritzlochs. Der Durchflussbeiwert c_D kann über die folgende Beziehung berechnet werden

$$c_D = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f u_B A_L}, \quad (2.6)$$

wobei \dot{m}_f den Massenstrom, ρ_f die Dichte der Flüssigkeit, A_L die Querschnittsfläche des Spritzlochs und u_B die theoretisch erreichbare Bernoulli-Geschwindigkeit (vgl. Gleichung 2.5) darstellt. Der Durchflussbeiwert ist eine Funktion der Re -Zahl und des Massenstroms oder des aufgetragenen Druckabfalls. Typische Werte reichen von Löchern mit scharfen Kanten und kurzen Spritzlochlängen von 0,6 bis 0,95 für Spritzlöcher mit abgerundeten Kanten und angemessenen Spritzlochlängen ($3 < l/d_L < 6$). Der Durchflussbeiwert stellt das Verhältnis aus tatsächlichem Durchfluss zu theoretisch möglichem Durchfluss dar und kann somit als Wirkungsgrad der Düse interpretiert werden. Ob Kavitation in einer Düse auftritt, ist ab einer bestimmten Ausprägung der Kavitation nur noch vom Vordruck und nicht mehr vom Differenzdruck abhängig. Ab diesem Moment (Kavitationsumschlagpunkt) spricht man von einer "durchaktivierten" Düse. Es kommt zu dieser Abhängigkeit, wenn der statische Druck der Strömung unter den Dampfdruck sinkt und die Schallgeschwindigkeit der Strömung beim Auftreten der Kavitation stark abfällt. Sobald die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums gleich oder größer als die Schallgeschwindigkeit ist, kann kein Impulsübertrag entgegen der Strömungsrichtung mehr stattfinden. Eine Änderung des Gegendrucks gelangt nicht in der Vordruckbereich, die Strömung ist somit vom Gegendruck unabhängig. [57, 73]

2.2 Wechselwirkung zwischen Gas und Tröpfchen

Sekundärzerfall Zwischen den durch den Primärzerfall entstehenden Tröpfchen und Ligamenten und der sie umgebenden Gasphase kommt es vor allem im Randbereich des Sprays zu intensiven Wechselwirkungen. In größerer Entfernung vom Düsenaustritt überwiegen die Auswirkungen der aerodynamischen Kräfte auf den Strahlzerfall, weshalb diese Region als Sekundärzerfallsbereich bezeichnet wird. Nach dem Primärzerfall haben die Tröpfchen noch keine stabile Größe erreicht, deshalb kommt es in größerer Entfernung vom Düsenaustritt zum Sekundärzerfall. Ein wichtiger Parameter, der benötigt wird, um den Prozess des Sekundärzerfalls zu charakterisieren, ist die Tröpfchen-Weber-Zahl

$$We_T = \frac{\rho_g u^2 d_p}{\sigma}. \quad (2.7)$$

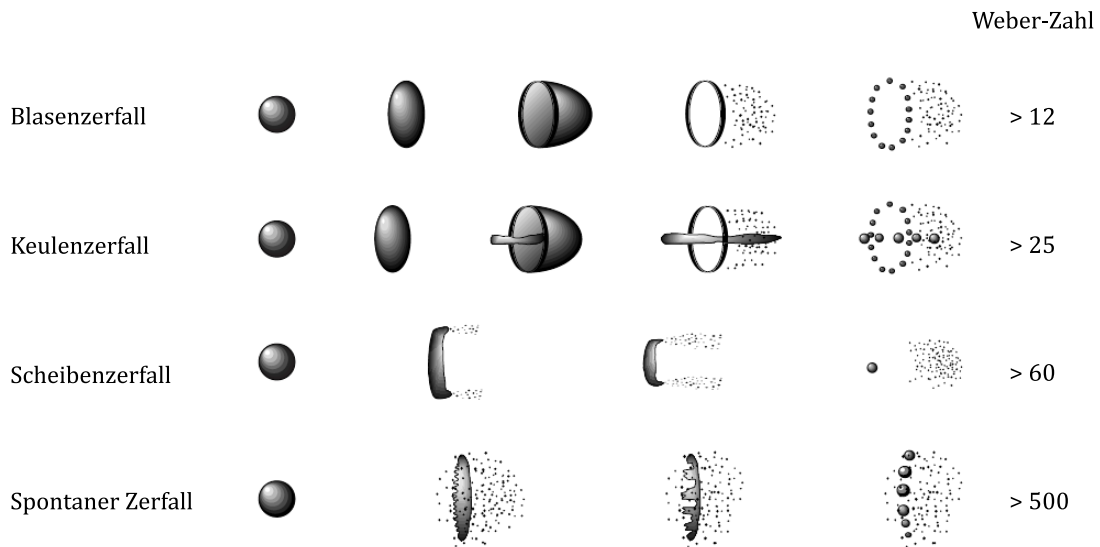


Abbildung 2.4: Zerfallsmechanismen nach Pilch und Erdmann [81], aus [86]

Formell stimmt die We_T -Zahl mit der im vorherigen Abschnitt eingeführten, den Primärzerfall beschreibenden, We -Zahl überein. Allerdings ist die charakteristische Länge nicht der Spritzlochdurchmesser d_L , sondern der Tröpfchendurchmesser d_p , und die charakteristische Geschwindigkeit u ist die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Tröpfchen und dem umgebenden Gas. Sekundärzerfallsmechanismen können ebenfalls anhand der Weber-Zahl charakterisiert werden. Durch experimentelle Untersuchungen wurden fünf Regimes identifiziert. [81]

- Für geringe Weber-Zahlen $We_T < 12$ findet kein Sekundärzerfall statt. Unterhalb dieser Grenze treten nur Oszillationen an den Tröpfchen auf.
- Für We -Zahlen zwischen $12 < We_T < 25$ verformt sich das Tröpfchen in eine Scheibe, wie in Abbildung 2.4 in der oberen Reihe erkennbar ist. Sobald der Durchmesser der Scheibe in etwa den doppelten des ursprünglichen Tröpfchens erreicht hat, wird durch den dynamischen Druck im Zentrum der Scheibe eine Membran geformt. Die Masse des Tröpfchens verschiebt sich an dessen Rand und formt dort einen Ring. Sobald eine kritische Dicke der Membran erreicht ist, zerfällt sie in kleine Tröpfchen.
- Der Keulenzерfall (zweite Reihe in Abbildung 2.4) tritt bei Weberzahlen zwischen $25 < We_T < 60$ auf. Die höheren aerodynamischen Kräfte verformen das Tröpfchen schneller zu einer Scheibe, sodass deutlich mehr der Tröpfchenmasse im Zentrum des Tröpfchens verbleibt. Diese formt eine Keule, während der Rest des Tröpfchens wieder einen Ring und eine Membran formt. Die drei Teile zerfallen anschließend in Tröpfchen unterschiedlicher Größe.
- Bei größeren Weber-Zahlen zwischen $60 < We_T < 500$ erfolgt der Scheibenzerfall, dargestellt in Abbildung 2.4 in der dritten Reihe. Durch die hohe Geschwindigkeit bleibt für den Großteil der Tröpfchenmasse nicht ausreichend Zeit, eine Blase oder eine Keule auszubilden. Das Tröpfchen verharzt als verformte Scheibe, kleine Tröpfchen werden von der Oberfläche abgelöst, bis das übrigbleibende Tröpfchen so klein ist, dass es nicht weiter vom Aufbruch betroffen ist.

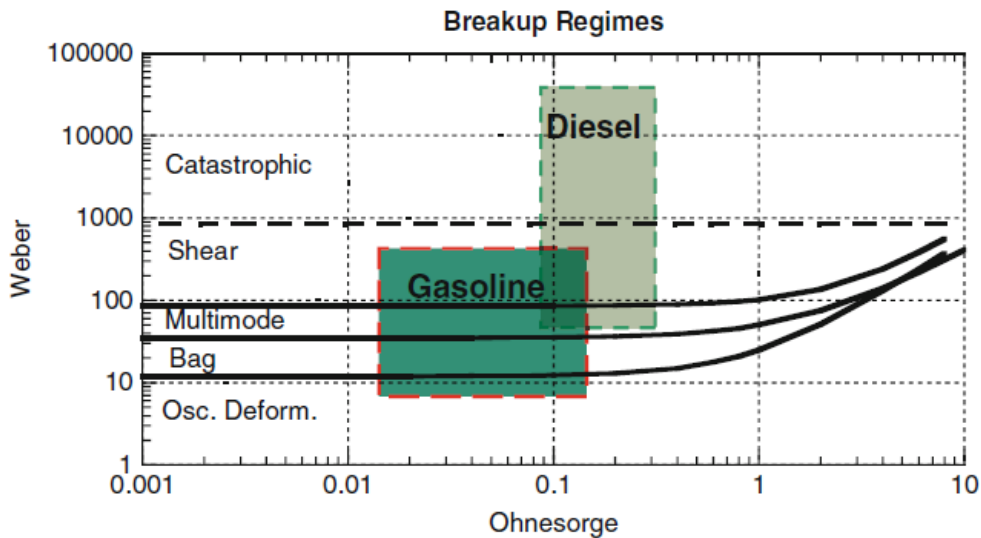


Abbildung 2.5: We - Oh -Diagramm für den Sekundärzerfall mit eingezeichneten Bereichen für die Benzin- bzw. Dieseleinspritzung, aus [86]

- Spontaner Zerfall tritt an Tröpfchen für Weber-Zahlen größer $We_T > 500$ auf, die untere Reihe der Abbildung 2.4 stellt diesen dar. In diesem Regime können kleine Störungen, die an der Oberfläche der Tröpfchen auftreten, nicht mehr geglättet werden. Sie werden hingegen durch die starken aerodynamischen Kräfte verstärkt. Die wachsenden Instabilitäten erreichen schnell makroskopische Dimensionen, was zu einem sehr schnellen Zerfall des Tröpfchens führt.

Eine hohe Viskosität der Tröpfchen verhindert Deformation und nutzt die Energie für eine verstärkte Zerstäubung um. Sobald die Ohnesorge-Zahl größer $Oh > 0,1$ ist, hat die Viskosität einen Einfluss auf das Verhalten des Tröpfchens. Bei geringerer Ohnesorge-Zahl scheint der Sekundärzerfall unabhängig von dieser zu sein.

Bei Kraftstoffsprays wird erwartet, dass die verschiedenen Sekundärzerfallsmechanismen simultan auftreten. Dies kann angenommen werden, da durch den Primärzerfall Tröpfchen und Ligamente mit unterschiedlichsten Geschwindigkeiten und Durchmessern entstehen. Innerhalb eines Sprays führt der Primärzerfall zu einer starken Variation der auftretenden Weber-Zahlen [77].

2.3 Airentainment

Zur Untersuchung der Gemischbildung sind Airentainmentuntersuchungen sehr hilfreich. Je besser sich das Spray mit der umgebenden Luft vermischt, desto schneller kann der Kraftstoff verdampfen und desto mehr Luft steht für den Verbrennungsvorgang zur Verfügung. Die Tröpfchen des Sprays geben ihren Impuls aufgrund der deutlich höheren Geschwindigkeit an die umgebenden Gasmoleküle ab. Das geschieht zunächst an der Sprayspitze, wodurch ein Teil des Gases verdrängt wird. Außerdem gelangt Gas am Sprayrand durch die Zwischenräume der Tröpfchen und erfährt im Inneren des Sprays eine Beschleunigung in Bewegungsrichtung des Sprays durch die Tröpfchen. Durch die Abgabe des Impulses an die umgebende Gasphase werden die Tröpfchen des Sprays abgebremst. Durch die Mitbeschleunigung des Gases im Inneren des Sprays sinkt dort der statische

Druck, wodurch ein Druckgefälle entsteht, das in Düsenhöhe, an dem Ort der größten Spraygeschwindigkeiten, am höchsten ist. Diesem Druckgefälle folgend strömt weiteres umgebendes Gas von außen radial in das Spray, in dem es wieder beschleunigt und in Sprayhauptbewegungsrichtung mitgerissen wird. Das radiale Einstromen des Gases in das Spray wird als Entrainment bezeichnet. Durch das Spray wird Gas aus dem Nahbereich der Düse abtransportiert, hierdurch kommt es zu einer Rückströmung außerhalb des Sprays von dessen Spitze zu den Bereichen in Düsenhöhe.

Bei den im Motor herrschenden thermodynamischen Bedingungen spielt außerdem die Verdampfung der Spraytröpfchen eine große Rolle beim Prozess der Gemischbildung, da durch die Entrainmentströmung heiße Luft ins Innere des Sprays gelangt und die Verdampfung dort beschleunigt. Die Nutzung der Verdampfungsenthalpie resultiert in einer Abkühlung des Bereichs im Spraykern, die eine weitere Reduzierung des statischen Drucks bewirkt, was wiederum die Entrainmentströmung verstärkt.

Für den Entrainmentmassenstrom gilt nach Siebers [96] an einem vereinfachten Spraymodell nach einer Bilanz der Massen- und Impulsströme für den gesamten Entrainmentmassenstrom \dot{m}_g bis zu einer axialen Position z_s die Beziehung

$$\dot{m}_g \propto \sqrt{\rho_g \rho_f} d_L z_s u_f \tan \frac{\theta}{2}. \quad (2.8)$$

Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Verdampfung und Einspritzrate ein, das die konstante Länge des flüssigen Spraykerns bestimmt. Siebers [96] hat experimentell gezeigt, dass sich bei der Einspritzung von Dieselsprays ein Gleichgewicht zwischen der stetig verdampfenden Menge an Kraftstoff und der Einspritzrate bildet, das in einer über die Einspritzung konstanten Länge des flüssigen Spraykerns resultiert. Die Länge ist von der Düsenhöhe bis zu dem Punkt in Sprayrichtung definiert, in dem noch flüssiger Kraftstoff detektierbar ist. Diese Länge wird als Flüssigkeitsreichweite bezeichnet.

Die Abhängigkeit des Entrainmentmassenstrom vom Einspritzdruck soll im Folgenden kurz dargestellt werden. Nach Gleichung 2.9 ist der Entrainmentmassenstrom proportional zur Düsenaustrittsgeschwindigkeit des Sprays u_f , die nach Gleichung 2.6 abgeschätzt werden kann. Hieraus folgt, dass der Entrainmentmassenstrom proportional zur Wurzel der Druckdifferenz zwischen Einspritzdruck und Umgebungsdruck ist ($\dot{m}_g \propto \sqrt{p_E - p_g}$). Für einen Massenstrom, der durch eine Kontrollfläche A_f fließt, gilt außerdem

$$\dot{m}_g = \rho_g A_f u_g. \quad (2.9)$$

Aus der Gleichung folgt, dass sich die Entrainmentgeschwindigkeit u_g genauso verhält wie der Entrainmentmassenstrom, wenn Druckverluste in der Düse außer Acht gelassen werden. Bei strömungsoptimierten Düsen ist dieser Unterschied allerdings nur geringfügig. Daher folgt, dass

$$u_g \propto \sqrt{\frac{2(p_E - p_g)}{\rho_f}} \quad (2.10)$$

ist. Dieser Zusammenhang kann genutzt werden, um Messungen des Airentrainments in das Spray über dessen Geschwindigkeit zu validieren.

2.4 Verdampfung und Gemischbildung

Durch Primär- und Sekundärzerfall vermischen sich die Kraftstofftröpfchen mit der umgebenden Luft. Da die Tröpfchen bei der Dieselmotorkraftstoffeinspritzung unter Gegendruck in heiße Umgebung eingespritzt werden, nimmt die Größe der Tröpfchen während des Prozesses weiter ab, bis sie schließlich durch das Verdampfen komplett verschwinden. Bei der Benzineinspritzung sind die Umgebungsbedingungen moderater, allerdings ist Benzinkraftstoff flüchtiger. Energie wird durch Konvektion vom heißen umgebenden Gas auf die vergleichbar kalten Tröpfchen übertragen. Die Verdampfung läuft mit einer Verformung des Tröpfchens ab, da ein flaches Tröpfchen ein größeres Oberfläche-zu-Volumen Verhältnis aufweist, das durch einen verbesserten Wärmeübertrag und damit eine schnellere Verdampfung gekennzeichnet ist.

Der Prozess der Verdampfung beschreibt den Phasenübergang der Moleküle innerhalb einer Flüssigkeit in die umgebende Gasphase, indem intermolekulare Kräfte überwunden werden. Sobald einer Flüssigkeit Wärme hinzugefügt wird, steigt deren Temperatur und somit auch die kinetische Energie der flüssigen Moleküle. Die Reduzierung des Gegendrucks führt ebenfalls zu einem früheren Übergang der Moleküle in die Gasphase [53].

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Tröpfchen solange transient erhitzt wird, bis es eine stationäre Verdampfung erreicht [102]. Die stationäre Verdampfung wird durch das d^2 -Gesetz, dass das Quadrat des Tröpfchendurchmessers über der Zeit t darstellt, durch die Beziehung

$$d^2(t) = d_0^2 - \beta_v t \quad (2.11)$$

beschrieben. Hierbei ist d der Tröpfchendurchmesser, d_0 der Anfangsdurchmesser des Tröpfchens und β_v der Verdampfungskoeffizient [101].

Die Verdampfung eines Sprays wird anhand der Verdampfung einzelner Tröpfchen modelliert. Die Verdampfungsrate wird bei klassischen Spraysimulationen nicht über den Temperaturgradient und Speziesgradient jedes einzelnen Tröpfchen aufgelöst. Stattdessen wird diese aus einer quasi-stationären Analyse eines einzelnen, isolierten Tröpfchens in ruhiger Atmosphäre abgeleitet [32]. Um einen Überblick über verschiedene Modelle der Tröpfchenverdampfung zu bekommen, kann zum Beispiel Lippert und Reitz [62] für die Dieselveerdampfung zu Rate gezogen werden.

In einem Spray kann der Verdampfungsprozess eines Tröpfchens durch die umgebenden Tröpfchen beeinflusst werden. Die Arbeit von Bellan und Harstad [14] zeigt, dass die Verdampfung in einem dichten Spray hauptsächlich aufgrund von Diffusionseffekten stattfindet. Konvektion spielt in den weniger dichten Bereichen des Sprays eine Rolle.

Die Modellierung eines einzelnen Tröpfchens ist bisweilen sehr anspruchsvoll, dennoch gibt es auch Ansätze, die Verdampfung von Sprays als Ganzes abzubilden. Siebers [96] bildet die Verdampfung vollständig anhand eines stark vereinfachten Verdampfungsmodells in heißer Atmosphäre ab. Hierbei wird angenommen, dass die Verdampfung des Dieselsprays mischungslimitiert ist. Das Airentrainment des heißen umgebenden Gases in das Spray sowie der Transport und die Mischung von Kraftstoff mit der umgebenden Luft sind Teile der Gemischbildung, die in dieser Betrachtung grundlegend sind. Die dem Modell zugrunde liegende Annahme ist, dass die Energie, die benötigt wird, um das flüssige Spray zu verdampfen, ausschließlich aus der Enthalpie des einströmenden Gases stammt. Die Flüssigkeitsreichweite des Sprays erreicht eine bestimmte, konstante Weite.

Diese wird benötigt, damit ausreichend heißes Gas die einzelnen Tröpfchen umgibt, um das flüssige Spray zu verdampfen.

2.5 Motorrelevante Charakterisierung der Sprays in der Direkteinspritzung

Die Direkteinspritzung hat sich zunächst bei den Dieselmotoren in den 1990er Jahren zuerst beim LKW, anschließend beim PKW, durchgesetzt. Ende des Jahrzehnts folgten erste Serien-PKW mit direkteinspritzenden Ottomotoren. Bei der Kraftstoffdirekteinspritzung wird der flüssige Kraftstoff so im Gas des Brennraums verteilt, dass ein Spray aus kleinen Tröpfchen entsteht, das sich möglichst gut mit der Brennraumluft durchmischt.

2.5.1 Dieselspray

Im Dieselmotor benötigt der Kraftstoff zur Selbstzündung hohe Drücke und Temperaturen im Brennraum, weshalb die Einspritzung bei hoher Kompression, um den oberen Totpunkt, stattfindet. Die Common-Rail-Technik hat sich wegen ihres einfachen Aufbaus und damit einhergehender niedriger Kosten durchgesetzt. Außerdem können durch die Technik Freiheitsgrade gewonnen werden. Daraus entstehen folgende Anforderungen an die Einspritzung:

- Bei hohen Drehzahlen existiert nur eine sehr kurze Zeitspanne, in der eine Zündung möglich ist. Die Einspritzung muss daher sehr schnell erfolgen und in kurzer Zeit zu einer guten Mischung führen.
- Die Zerstäubung wird durch die Einspritzung gegen hohen Gegendruck unterstützt. Es muss jedoch trotz des hohen Drucks eine hohe Penetrationslänge in den Brennraum erreicht werden, damit auch größere Kraftstoffmengen bei Volllast ausreichend homogenisieren.
- Der Siedebereich des Dieselmotorkraftstoffs liegt bei hohen Temperaturen von $150 - 380^\circ\text{C}$. Um die Verdampfung und die Gemischbildung dennoch zu beschleunigen, sind Tröpfchen mit geringem Durchmesser und eine intensive Durchmischung mit Luft notwendig.
- Dieselmotorkraftstoff sollte für eine schadstoffarme und geräuscharme Verbrennung mit hohem Luftüberschuss verbrannt werden, auch deswegen ist eine gute Durchmischung essentiell.

Aus den genannten Anforderungen an das Dieselspray ergeben sich hohe Einspritzdrücke bis zu $p_E = 2500 \text{ bar}$ (2016) und kurze Einspritzdauern von etwa 1 ms . Diese Einspritzdüsen werden so gefertigt, dass durch ein möglichst langes Spritzloch eine hohe Penetration und ein später Strahlaufbruch gefördert werden. Die folgenden Messgrößen werden verwendet, um ein Dieselspray zu charakterisieren: Die Penetration L_S beschreibt die Reichweite des Sprays und der Kegelwinkel α die Ausbreitung im Raum. Beide Parameter werden zur Beschreibung einzelner Dieselsprays verwendet, wie Abbildung 2.6 links zeigt. Der Winkel φ beschreibt den Winkel zwischen Spray und Injektorachse und wird als Höhenwinkel bezeichnet.

Penetration Gemessen wird die Penetration L_S (Abbildung 2.6), vom Düsenlochaustritt bis zur Sprayspitze. Die Geschwindigkeit und Reichweite des Dieselsprays ist entscheidend für eine gute Gemischbildung. Zur Penetration von Dieselsprays wurden zahlreiche Untersuchungen

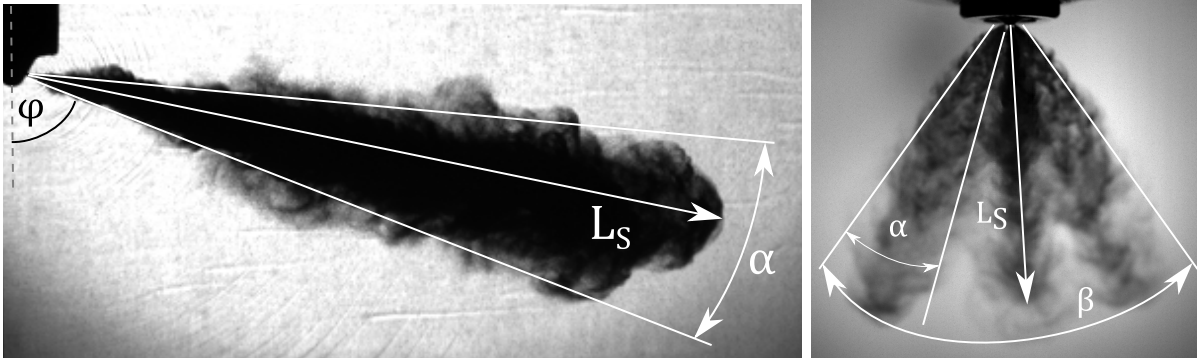


Abbildung 2.6: Charakteristische Größen Penetration und Kegelwinkel des Dieselsprays, links und des Benzinsprays, rechts (vergleiche Gleichung 2.9, $\theta = \alpha$)

durchgeführt. Die bekanntesten sind von Hiroyasu und Arai [47] und beschreiben das Spray wie folgt:

$$L_S = c_v \sqrt{2 \frac{p_E - p_g}{\rho_f} t}, \quad t < t_b, \quad (2.12)$$

$$L_S = c_v \sqrt{d_L t \sqrt{\frac{p_E - p_g}{\rho_g}}}, \quad t \geq t_b. \quad (2.13)$$

Dabei stellt c_v den Geschwindigkeitskoeffizienten dar, der aufgrund ungleicher Druckabfälle entlang der Düsenöffnung verschieden sein kann. Die Penetration L_S ist bis zum Aufbruchszeitpunkt t_b linear von der Zeit t abhängig. Ab diesem Zeitpunkt steigt die Penetration wurzelförmig mit der Zeit an, $L_S \propto \sqrt{t}$. Der Spritzlochdurchmesser beeinflusst die Penetration auch erst ab diesem Zeitpunkt, der lineare Anstieg ist unabhängig vom Durchmesser.

Kegelwinkel Der Kegelwinkel ist ein Maß für die räumliche Sprayausbreitung. Grundlegende Arbeiten von Hiroyasu und Arai [47] zeigen, dass die Sprayausbreitung neben der Einspritzgeschwindigkeit hauptsächlich von Spritzlochdurchmesser, Kraftstoffdichte und Gasdichte im Brennraum abhängig ist. Ab Einspritzgeschwindigkeiten von 100 m/s ist ein weiterer Kegelwinkel um 20° ausgebildet. Bei niedrigeren Einspritzdrücken ist das Spray noch deutlich schmaler. Der Kegelwinkel steigt mit der Einspritzgeschwindigkeit zunächst linear an, bis ein komplettes, turbulentes Spray ausgebildet ist. Sobald dies der Fall ist, sinkt der Kegelwinkel leicht auf ein stationäres Niveau.

Flüssigkeitsreichweite Die Flüssigkeitsreichweite ist ein weiterer wichtiger Parameter, der zur Charakterisierung von Dieselsprays genutzt wird. Im Gegensatz zur Penetration stellt die Flüssigkeitsreichweite bei verdampfenden Bedingungen den Abstand zwischen Düsenaustritt und Spitze des flüssigen Sprays dar. Nach Siebers [96] folgt die Flüssigkeitsreichweite folgender Beziehung:

$$F_L \propto d_L. \quad (2.14)$$

Die Flüssigkeitsreichweite ist linear vom Spritzlochdurchmesser abhängig. Diese lineare Abhängigkeit ist unabhängig von allen anderen Größen. Der Einspritzdruck hat keinen Einfluss auf die Flüssigkeitsreichweite. Temperatur und Gasdichte hingegen sorgen bei deren Anstieg für einen Rückgang in der Flüssigkeitsreichweite. Der verdampfte Kraftstoff dringt jenseits von F_L weiter in den Brennraum ein.

2.5.2 Benzinspray

Vor allem im Betrieb bei Teillast weisen drosselgesteuerte Ottomotoren gegenüber Dieselmotoren in Folge von drei Hauptgründen einen verringerten Wirkungsgrad: Die Thermodynamik und somit das verringerte Kompressionsverhältnis, das Drosseln und die ineffiziente Verbrennung bei $\lambda = 1$, durch die viel restliche Energie im Abgas in HC und CO steckt [13]. Bei Ottomotoren mit innerer Gemischbildung wird der Kraftstoff je nach Brennverfahren während des Ansaughubs in die Ansaugluft eingespritzt. Für Ottomotoren mit Direkteinspritzung gibt es zwei verschiedene Betriebsstrategien, die sich durch den Einspritzzeitpunkt, ihre Drosselklappenstellung und die Gemischzusammensetzung unterscheiden. Bei höheren Lasten und im Bereich der Volllast wird der Motor mit homogener Gemischzusammensetzung betrieben. In sehr wenigen Motoren erfolgt im Teillastbetrieb ein Schichtladebetrieb [13]. Der Einspritzzeitpunkt wirkt sich auf die motorische Verbrennung und damit auf die Emissionen und die Laufruhe eines Motors mit Benzindirekteinspritzung aus [107]. Ein früher Einspritzzeitpunkt sorgt für niedrige Emissionen durch die lange Gemischaufbereitungszeit. Aufgrund von Overmixing¹ ist ein Anstieg der HC-Emissionen zu verzeichnen. Hierbei wird die Entflammung verzögert und es erfolgt eine langsame Umsetzung. Im Gegensatz dazu führt eine späte Einspritzung zu niedrigen HC- und NO_x-Emissionen. Hier sind allerdings die Rußemissionen durch die kurze Gemischbildungszeit erhöht (heterogene Diffusionsverbrennung). Für Einspritzventil und Zündkerze besteht hier zusätzlich die Gefahr von Verkokung [13]. Die Grundvoraussetzung aller Konzepte ist, dass zum Zündzeitpunkt ein zündfähiges Gemisch an der Zündkerze bereit gestellt werden kann. Das Spray sollte bereits verdampft und außer bei Schichtbetrieb homogenisiert vorliegen. Im Gegensatz zur Saugrohreinspritzung, bei der der Einspritzdruck unter $p_E < 10$ bar liegt, wird bei der Direkteinspritzung ein Einspritzdruck von $p_E = 50 - 350$ bar genutzt. Durch die Direkteinspritzung kann durch Luftüberschuss eine Ladungsschichtung erreicht werden, bei der das Gemisch an der Zündkerze trotz global magerer Bedingungen zündfähig bleibt und so die Drosselverluste verringert werden können. Hauptvorteil der Direkteinspritzung ist der Kühlungseffekt, durch den die Klopfneigung des Gemischs sinkt und ein erhöhter Wirkungsgrad erzielt werden kann, da ein erhöhtes Kompressionsverhältnis oder eine frühere Zündung ermöglicht wird. Im Schichtbetrieb liegt der Vorteil bei den, aufgrund der isolierenden, umhüllenden Luft, geringeren Wärmeverlusten zu den Wänden. Es wird Benzin, ein komplexes Gemisch aus verschiedenen, überwiegend leichten Kohlenwasserstoffen, verwendet. Die Qualität des Brennverfahrens wird maßgeblich durch das Kraftstoffspray und dessen Eigenschaften beeinflusst. Folgende Anforderungen ergeben sich für den Einsatzbereichs des Ottomotors:

- Die zeitlich schnelle Abfolge von Einspritzung und Zündung verhindert eine vollständige Verdampfung des Kraftstoffs im Schichtbetrieb. Zum Zeitpunkt der Zündung muss im Bereich der Zündkerze ein zündfähiges Gemisch vorliegen.
- Bei der Benzineinspritzung werden Gemischbildung und Verbrennung entkoppelt. Somit ist für die Zerstäubung mehr Zeit und es können niedrigere Einspritzdrücke als beim Dieselmotor genutzt werden.

¹Beim Overmixing entstehen zu magere, nicht mehr brennbare Bereiche

- Durch den niedrigeren Gegendruck können die Brennraumwände leicht benetzt werden, was zu einer erhöhten Partikel- und HC-Bildung führen kann. Daher soll Wandbenetzung durch geringe Penetration und geringere Temperaturen vermieden werden.
- Der Siedebereich des Ottokraftstoffs ist mit $30 - 215\text{ °C}$ deutlich niedriger als beim Dieselloststoff.
- Der Kraftstoff ist wegen des geringeren Wirkungsgrades leichter zu zerstäuben.

Aus den dargestellten Anforderungen an das Benzinspray ergeben sich, ähnlich zu dem im vorherigen Abschnitt behandelten Dieselspray, die folgenden Messgrößen. Die Spritzlöcher werden bei Benzindüsen im Gegensatz zu Dieseldüsen so gefertigt, dass sie die Flüssigkeit nicht stabilisieren, sondern für einen frühen Aufbruch und somit eine kürzere Penetration sorgen. Penetration und Kegelwinkel sind somit auch bei Untersuchungen von Benzinsprays von Interesse, sie sind in Abbildung 2.6 rechts dargestellt. Bei Benzinsprays wird häufig der Gesamtkegelwinkel β des Sprays betrachtet, der Kegelwinkel eines Einzelsprays α und die Penetration L_S einer einzelnen Spraykeule sind jedoch auch hier von Interesse, allerdings durch die Nähe des Sprays zueinander oft schwer separat zu bestimmen.

Im Allgemeinen sind eine schnelle Zerstäubung zu möglichst kleinen Tröpfchen sowie eine möglichst gute Durchmischung des Kraftstoffsprays mit der umgebenden Luft, die eine schnelle Verdampfung unterstützt, vorteilhaft.

2.6 Interagierende Sprays

Durch die Interaktion von Sprays können zusätzliche Freiheitsgrade für die Zerstäubung eines Kraftstoffs in einen Tröpfchennebel gewonnen werden. Angewandt auf den jeweiligen Einsatzbereich können so potentielle Vorteile in der Zerstäubung, Verdampfung und Gemischbildung erzielt werden.

Die Interaktion zweier Sprays wird vor allem durch die Interaktion der einzelnen Tröpfchen des Sprays beeinflusst. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie diese Interaktion zwischen den Tröpfchen ablaufen kann. Der wichtigste Aspekt der Interaktion ist die Stabilität der Kollision. Die Stabilität beschreibt, ob sich zwei Tröpfchen, die kollidieren, anschließend vereinigen und ein neues stabiles Tröpfchen formen oder ob sich die kollidierenden Tröpfchen wieder voneinander trennen und entweder das ursprüngliche Volumen beibehalten oder mehrere Tröpfchen mit kleinerem Volumen formen. Die Kollision von Tröpfchen kann genauso wie der Strahlaufbruch in verschiedene Regimes unterteilt werden, die im Folgenden dargestellt werden. Generell können vier verschiedene Kollisionstypen unterschieden werden. Sie werden anhand der Weber-Zahl We_F und eines dimensionslosen Einflussparameters X charakterisiert, der das Verhältnis aus Abstand der Mittelpunkte der beiden Tröpfchen und dem mittleren Durchmesser beider Tröpfchen darstellt [19, 20] (Abbildung 2.7).

- **Koaleszenz** Für niedrige Weber-Zahlen ($We_F < 4$) verschmelzen die Tröpfchen und bilden ein größeres Tröpfchen, dessen Volumen der Summe der Volumen der kollidierenden Tröpfchen entspricht. Durch diese Art der Kollision entstehen Tröpfchen mit größerem Durchmesser. Die Koaleszenz hat somit Einfluss auf die Tröpfchengrößenverteilung innerhalb eines Sprays.

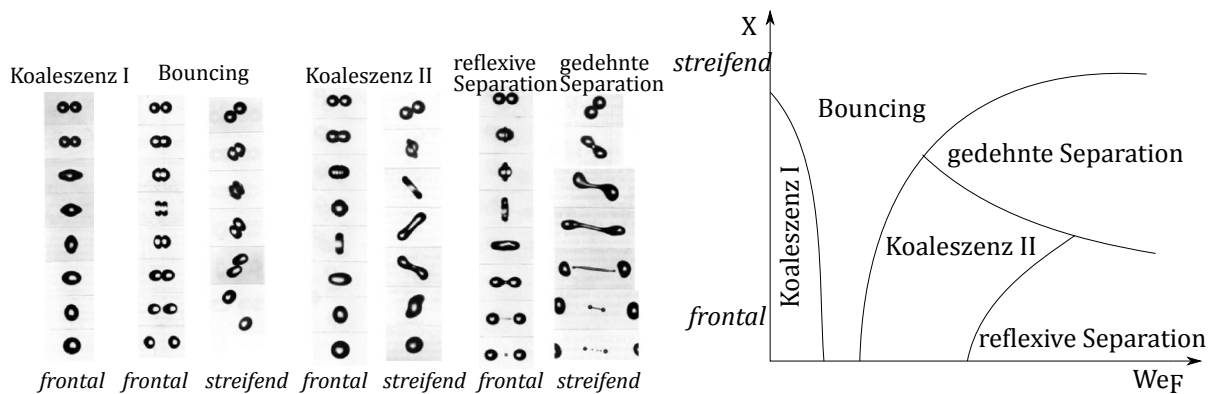


Abbildung 2.7: Darstellung der verschiedenen Kollisionsarten (links) und eines Kollisionsnomograms (rechts) für gleichgroße Tröpfchen in Abhängigkeit des Kollisionsparameters und der Weber-Zahl für konstante Ohnesorge-Zahl nach [20]

- **Bouncing** Mit steigender Weber-Zahl ($4 < We_F < 10$) kommt es vermehrt zum Bouncing. Das umgebende Gas, das mitgerissen wird, ist für das Bouncing verantwortlich. Durch das zwischen den sich nähernden Tröpfchen gefangene Gas kommen die beiden flüssigen Oberflächen der kollidierenden Tröpfchen nicht in Kontakt, was für eine Koaleszenz aber erforderlich wäre. Beim Aufeinanderprallen der beiden Tröpfchen findet kein Massentransfer zwischen den beiden statt, die beiden Tröpfchen prallen voneinander ab.
- **Reflexive Separation** Die reflexive Separation ist bei hohen Weber- und Reynoldszahlen vorherrschend. In diesem Regime ($We_F > 30$ und $X > 0,3$) ist die kinetische Energie der Tröpfchen groß genug, um eine Verformung auszulösen, die oft zu einem Aufbruch des flüssigen Systems in drei Tröpfchen, mit jeweils geringerem Volumen als das der beiden ursprünglichen führt.
- **Gedehnte Separation** Für $We_F > 30$ und $X < 0,3$ kommt es zur gedehnten Separation. Es formt sich eine flüssige Verbindung zwischen den beiden kollidierenden Tröpfchen, die durch die gegensätzliche Bewegung der ursprünglichen Tröpfchen in die Länge gezogen wird. Es entstehen zahlreiche Tröpfchen, die deutlich kleiner als die ursprünglichen Tröpfchen sind. Die Anzahl der Tröpfchen hängt von der Länge des flüssigen Ligaments ab.

Das entsprechende Regime für die Kollision von Benzinsprays kann a priori nicht bestimmt werden, da die Geschwindigkeitsverteilung im Spray nicht bekannt ist und von unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausgegangen werden muss.

2.6.1 Interaktion fast paralleler Sprays

Die Interaktion fast paralleler Sprays kann nach Anderson und Spall [4] in drei verschiedene Bereiche unterteilt werden, Abbildung 2.8 stellt diese dar. Im Nahbereich der Spritzlöcher sind die beiden Sprays noch getrennt und treffen erst in kurzem Abstand von den Spritzlöchern aufeinander. Dieser Abstand, in dem die beiden Sprays miteinander interagieren, ist von der Distanz zwischen den beiden Spritzlöchern und von der Aufweitung des Sprays abhängig. Die beiden Jets interagieren aufgrund ihrer Ausrichtung und der Entrainmentströmung in sie hinein, die eine Zone mit niedrigem statischen Druck zwischen den beiden Sprays entstehen lässt. Durch den Unterdruck in diesem Bereich bewegen sich die beiden Einzelsprays aufeinander zu. Im Bereich

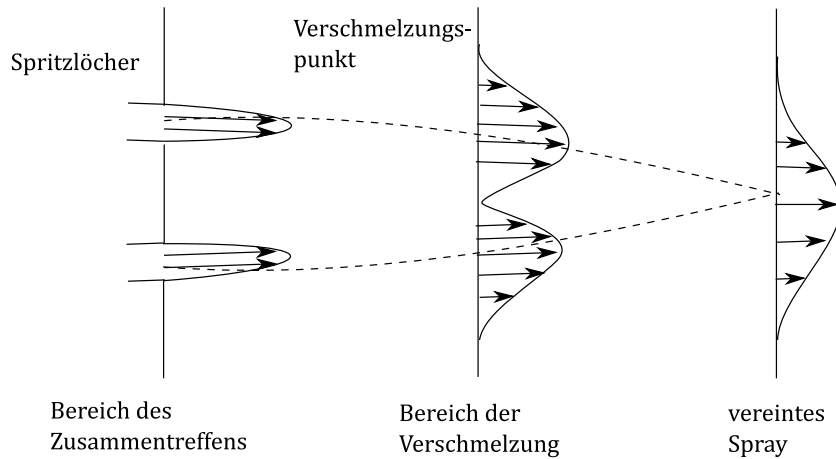


Abbildung 2.8: Skizze von interagierenden, fast parallelen Flüssigkeitsjets, nach [4]

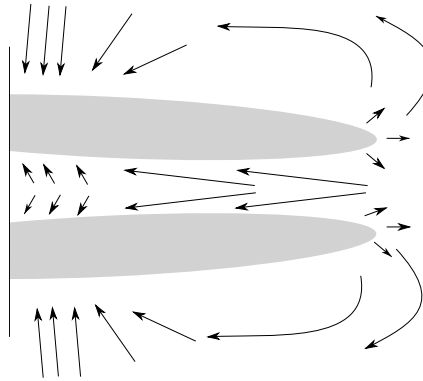


Abbildung 2.9: Skizze des Airentrainments an den interagierenden, fast parallelen Flüssigkeitsjets im Detail

der Interaktion beginnen sich die Geschwindigkeitsprofile der beiden Sprays zu überlappen. Nach einem Abstand vom Düsenaustritt haben sich die beiden Sprays zu einem vereint und verhalten sich ab diesem Moment auch so. Das Geschwindigkeitsprofil entspricht dem eines einzelnen Sprays. Abbildung 2.9 zeigt das Airentrainement an den beiden Einzeljets kurz nach Düsenaustritt. Pawlowksi [77] zeigt, dass ein Entrainment zwischen zwei Dieseljets erwartet werden kann.

Diesel wird bei sehr hohen Temperaturen und Gegendrücken in den Motorraum eingespritzt. Gao *et al.* [39] und Park *et al.* [75] verwenden daher ein Modell von Gasjets um interagierende, fast parallele Dieselsprays abzubilden. Es wird davon ausgegangen, dass der Kraftstoff sehr schnell verdampft und sich daher wie ein Gasjet verhält. Der meiste Impuls wird durch die Gasphase getragen. Die Vereinigung der beiden Sprays kann, wie in Abbildung 2.10 zu sehen ist, dargestellt werden. Die beiden Einzelsprays (Jet 1 und Jet 2) einer gruppierten Lochdüse haben einen geringen Abstand zueinander, die beiden Jets interagieren, beziehungsweise überlappen sich, nach kurzem Abstand vom Düsenaustritt miteinander. Als Grundlage für das Gasjet-Modell dient die Impulserhaltung der beiden Gasjets:

$$\dot{m}_3 v_3 = \dot{m}_1 v_1 + \dot{m}_2 v_2. \quad (2.15)$$

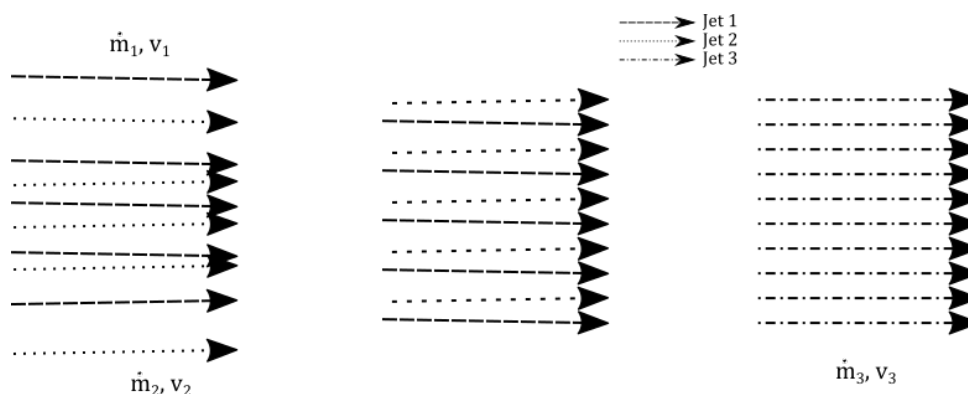


Abbildung 2.10: Modellierung der Vereinigung der beiden einzelnen, als Gasfreistrahlen vereinfachten Dieselsprays zu einem einzelnen Strahl, nach [75]

Das verwendete Modell wurde für verschiedene Einspritz- und Gegendrücke anhand der Penetration validiert. Es kann die Geschwindigkeit des vereinten Jets bestimmt werden. Der Einfluss des Winkels zwischen den beiden Sprays kann über die Simulation der gruppierten Lochdüse als Gasfreistrahlen berechnet werden. Die Geschwindigkeit v_3 kann aus den beiden Einzelgeschwindigkeiten bestimmt werden, sodass die Interaktion der beiden Dieselsprays über Gasfreistrahlen abgebildet werden kann [75].

2.6.2 Kollision von Sprays

Eine Eigenschaft des im letzten Abschnitt beschriebenen Strahlzerfallsmechanismus eines Freistrahls ist, dass der Strahl eine gewisse Distanz braucht, bis er durch Primär- und Sekundärzerfallsmechanismen in kleine Tröpfchen aufbricht, da sich das Spray hauptsächlich entlang einer Achse ausbreitet. Bei geringen Gegendrücken im Ottomotor kann dies unter Umständen dazu führen, dass keine ausreichende Zerstäubung erreicht wird und sich die Flüssigkeit zu weit in den Brennraum, bis an die Wand, hinein bewegt. Als alternatives Zerstäubungskonzept von Kraftstoffsprays wurde von Durst *et al.* [29] die Twinjet-Zerstäubung vorgeschlagen. Da eine geringere Penetration vor allem bei der Benzineinspritzung von Vorteil ist, soll das Konzept in diesem Bereich angewendet werden.

Das Prinzip der Prallzerstäubung zweier flüssiger Jets ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Dabei wird die Zerstäubung der Flüssigkeit durch die Kollision der beiden Jets getrieben. Zwei zylindrische, flüssige, kollidierende Jets lassen eine elliptische, blattförmige Lamelle normal zur Achse der beiden Jets (y -Achse - Kollisionsachse) entstehen. Die resultierende Lamelle, die sich in z -Richtung (Ausbreitungsrichtung) bewegt, ist instabil und zerfällt schon bei geringen Einspritzdrücken nach kurzem Abstand in feine Tröpfchen [74, 18, 22]. Die meisten Untersuchungen zu kollidierenden Jets in der Literatur wurden bei relativ geringem Einspritzdruck und somit geringen Weber- und Reynoldszahlen durchgeführt, die im Gegensatz zu den hohen Einspritzdrücken bei der Kraftstoffeinspritzung stehen. In der Abbildung sind die beiden Jets dargestellt, die unter einem Winkel 2θ aufeinandertreffen. Die aus der Lamelle entstehenden Ligamente und Tröpfchen sind ebenfalls abgebildet. Außerdem sind die Größen, anhand derer das Spray charakterisiert werden kann, dargestellt: Die Penetration, der Abstand zwischen den Ligamenten und deren Durchmesser.

Die Zerstäubung durch die Kollision zweier flüssiger Jets kann genauso wie die Zerstäubung eines Einzeljets nach Bailardi *et al.* [12] in verschiedene Regimes unterteilt werden, die in Abbildung

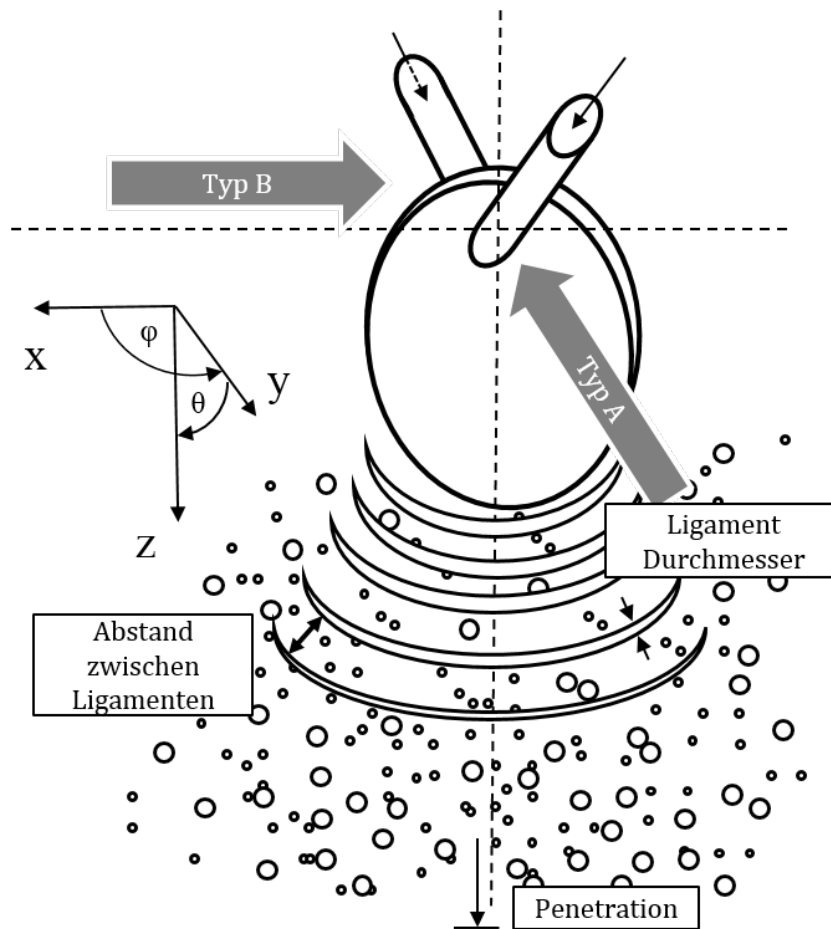


Abbildung 2.11: Darstellung der Kollision zweier Jets

2.12 dargestellt sind. Auch hier verändert sich das Verhalten der Zerstäubung mit steigender Jet-Geschwindigkeit und den Eigenschaften der Flüssigkeit. Vier der verschiedenen Bereiche werden im Folgenden vorgestellt:

- **Closed Rim:** Die Lamelle, die zwischen den beiden Jets entsteht, zieht sich durch die Oberflächenspannung zu einem geschlossenen Ring zusammen, wie in Abbildung 2.12 links gezeigt ist. Am unteren Ende des Rings kollidieren die beiden Zweige unter einem bestimmten Winkel. Ab diesem Punkt entsteht entweder eine einfache Strömung, die in Tröpfchen zerfällt, oder es bildet sich eine zweite Lamelle senkrecht zur ersten aus, die dann in Tröpfchen zerfällt.
- **Open Rim:** Auf dem unteren Teil der Lamelle bilden sich durch Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten Oberflächenwellen aus, die die Lamelle aufgrund von Kapillareffekten am Rand in bandartige Strukturen und größere Tröpfchen [18] zerfallen lassen. Dargestellt in Abbildung 2.12, zweite von links. Die Destabilisierung des Randes, entweder durch eine externe Störung oder durch die Jets selbst beeinflusst, zeigt, dass die Störung eine kapillare Instabilität ist. Die Wellenlänge dieser Störung ist proportional zum Durchmesser des Randes.
- **Ruffled Sheet:** Der Kern der Lamelle ist nicht mehr gleichmäßig eben wie bei niedrigeren We - und Re -Zahlen. Wellenartige Strukturen sind direkt auf der Lamelle zu finden. Die

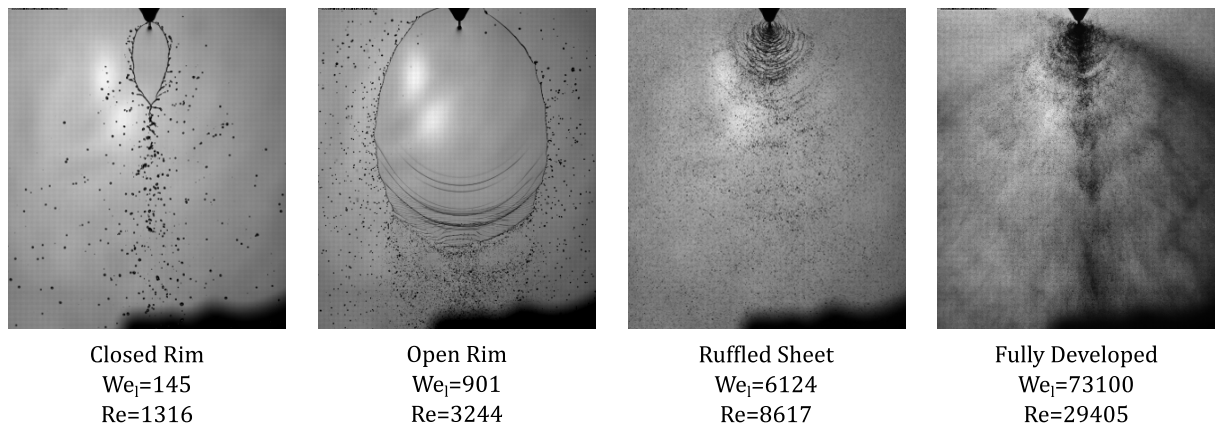


Abbildung 2.12: Zerfallsregimes der Prallzerstäubung für zwei kollidierende Flüssigkeitsjets bei von links nach rechts ansteigenden We - und Re -Zahlen. Kraftstoff Dekan ($Oh = 0,0076$), aus [12].

bogenförmigen Ligamente, die sich periodisch in Richtung der Hauptachse des Sprays bewegen, zerfallen, je weiter sie sich fortbewegen, durch aerodynamische Kräfte in immer kleinere Tröpfchen. Das *Ruffled Sheet* ist in Abbildung 2.12 das zweite von rechts.

- Fully developed: Die Jets zerfallen sofort nach der Kollision in einzelne Tröpfchen, ohne dass eine Lamelle entsteht. Die entstehenden Primärtröpfchen bewegen sich wellenförmig in Tröpfchenwolken nach außen und zerfallen durch Sekundärzerfall zu immer kleineren Tröpfchen. Die Re -Zahl deutet auf eine turbulente Strömung hin. Dargestellt ist der *Fully Developed Breakup* in Abbildung 2.12 rechts.

Mit Anstieg des Einspritzdrucks und somit der Re - und We -Zahl wird die entstehende Lamelle unebener, bis sich Tröpfchenwolken in wellenförmigen Strukturen vom Kollisionspunkt in Richtung der Hauptachse des Sprays (z -Achse) fortbewegen. Bei der Kraftstoffeinspritzung werden Re -Zahlen ab 10.000 erreicht, somit wird bei der Prallzerstäubung von Benzinsprays eine entstehende Lamelle im *Ruffled Sheet* oder *Fully Developed* Regime erwartet. Bei der Benzinzerstäubung kann von turbulenten Bedingungen ausgegangen werden.

Eine laminare Lamelle zerwellt durch das Anwachsen von Störungen. [18, 26] Es wird angenommen, dass die am schnellsten wachsende Welle die Form der Lamelle beeinflusst. Durch die Störungen zerfällt sie in Ligamente und anschließend in Tröpfchen [5]. Durch ein Kräftegleichgewicht kann der Aufbruch in Tröpfchen dargestellt und berechnet werden. An der Lamelle stehen verschiedene Kräfte in Wechselwirkung: Kräfte, verursacht durch den umgebenden Gasdruck, die Oberflächenkräfte, die Trägheit der Flüssigkeit und die Viskosität. Stehen diese Kräfte im Gleichgewicht, kann die Aufbruchlänge der Lamelle sowie deren Dicke berechnet werden [11]. Auch der Tröpfchendurchmesser kann nach einer Beziehung von Dombrowski und Hooper [26] bestimmt werden.

Durch Variation des Kollisionswinkel zwischen den beiden Jets kann die Tröpfchengröße der entstehenden Tröpfchen beeinflusst werden [29]. Durch Einstellung eines größeren Kollisionswinkel werden kleinere Tröpfchen erwartet, da ein größeres horizontales Moment anliegt, das die Dicke der Lamelle verkleinert und sich somit auch der Durchmesser der Ligamente verringert. Die Geschwindigkeit in z -Richtung in die Lamelle ist umso größer, je geringer der Kollisionswinkel ist [22]. Um einen geeigneten Kollisionswinkel für die entsprechende Anwendung zu finden, muss

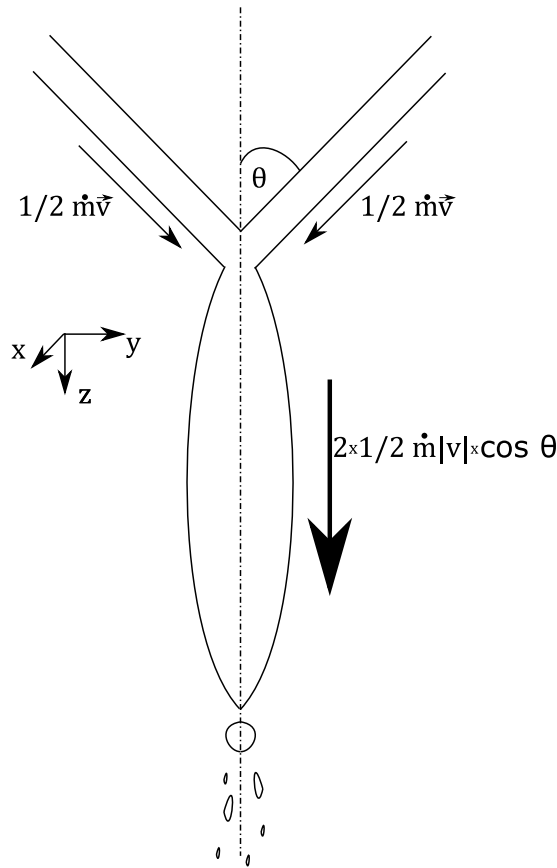


Abbildung 2.13: Skizze der Kollision zweier Flüssigkeitsjets, die unter dem Winkel θ aufeinanderprallen, nach [75]

ein Kompromiss zwischen der Größe der entstehenden Tröpfchen und deren Geschwindigkeit in Hauptbewegungsrichtung des Sprays (z-Achse) gefunden werden.

Abbildung 2.13 zeigt die Kollision der beiden Jets und die entstehende Lamelle in der Ebene dieser beiden. Das Moment, das über die beiden Jets transportiert wird, addiert sich unter Beachtung des Kollisionswinkels zu

$$\left\| \frac{1}{2} \dot{m} \vec{v} + \frac{1}{2} \dot{m} \vec{v} \right\| = \dot{m} \|\vec{v}\| \cos \theta. \quad (2.16)$$

Im Gegensatz zu den fast parallelen Jets, die im vorherigen Abschnitt betrachtet werden, muss hier der Faktor $\cos \theta$ des Kollisionswinkels in der Impulsbilanz zusätzlich berücksichtigt werden. Je kleiner dieser ist und somit je größer der Winkel zwischen den beiden Jets, desto stärker wird der Impuls in Bewegungsrichtung des Sprays verringert.

Arai *et al.* [6] haben die Kollision von Jets und die Kollision von bereits zerstäubten Sprays untersucht. In ihrem Experiment kollidieren zwei Flüssigkeitsjets im Nahbereich der Düse, weiter entfernt sind diese schon zu einzelnen Tröpfchen, die sich in einer Tröpfchenwolke fortbewegen, zerfallen. Bei der Kollision der noch intakten Jets wird die Penetration des Sprays verringert, bei der Kollision der bereits zerstäubten Sprays in einigem Abstand vom Spritzlochaustritt ist dies nicht mehr der Fall. Der Sauterdurchmesser d_{32} , für den das Verhältnis Volumen zu Oberfläche

dem der gesamten Flüssigkeit entspricht, wird durch die Kollision der beiden intakten Jets um 50 % verringert (Kollisionswinkel $\theta = 90^\circ$, Kraftstoff Ethanol, Kollisionspunkt in einem Abstand von $z = 10 \text{ mm}$). Bei Betrachtung von Wärmeübergangsprozessen, wie der Verdampfung, wird der Sauterdurchmesser häufig verwendet. Durch die Kollision der Sprays in größerem Abstand verringert sich der Sauterdurchmesser im Vergleich zu einer konventionellen Einspritzung ohne Kollision nur um 30 %. Eine Kollision der intakten Jets im Nahbereich der Düse scheint sich vorteilhaft auf eine Verringerung der Penetration und einen geringeren Sauter-Durchmesser auszuwirken. [6] Auslösender Mechanismus zur Reduzierung des Sauterdurchmessers kann einer der folgenden sein: Zum einen die entstehende Lamelle, die direkte Tröpfchenkollision oder die erhöhte Turbulenz durch die Kollision. Da dies beides gewünschte Punkte in der Benzindirekteinspritzung sind, sollte eine Kollision von noch möglichst intakten Flüssigkeitsjets favorisiert werden und diese somit möglichst nah nach Düsenaustritt stattfinden. Hierbei kann es durch Zurückspritzen des Kraftstoffs auf die Düse zu deren Benetzung kommen.

Experimenteller Aufbau und Messtechnik

In den folgenden Abschnitten werden die untersuchten Düsen sowie die für die Kraftstoffsprayuntersuchungen geeigneten Messtechniken kurz vorgestellt. Darüber hinaus werden auch die Versuchsträger, in denen die Messungen durchgeführt werden, vorgestellt. Die einzelnen Untersuchungen bieten immer nur einen unvollständigen Einblick in die betrachtete Interaktion der Sprays; erst die Zusammenfassung der verschiedenen Einzelergebnisse kann zu einem vollständigen Verständnis der auftretenden Phänomene und ihren Interaktionen führen.

3.1 Injektorsysteme und Düsen

Um die beiden Einspritzkonzepte der Interaktion detailliert zu betrachten, werden Untersuchungen an Dieselinjektoren zur Interaktion von fast parallelen Sprays und Untersuchungen an Benzininjektoren zur Kollision von Sprays im Nahbereich der Düse an Spraykammern durchgeführt. Im Folgenden werden zunächst die Dieselinjektoren, anschließend die Benzininjektoren und die verwendete Messtechnik sowie abschließend die genutzten Druckkammern vorgestellt. In Abbildung 3.1 ist hierzu ein Überblick gegeben.

3.1.1 Diesel - gruppierte Lochdüse

Die Untersuchung der Interaktion zweier fast paralleler Einzelsprays wurde an Piezo-Hochdruck-Einspritzinjektoren mit speziell angefertigten Düsen durchgeführt. Es stehen prinzipiell baugleiche Injektoren mit verschiedenen Düsenlayouts zur Verfügung. Neben einer gruppierten Düse mit drei Lochpaaren, die gleichwinklig verteilt sind, werden noch drei entsprechende Referenzdüsen untersucht. Gute optische Zugänglichkeit zu einem Spray wird durch Drei-Loch-Düsen bzw. Drei-Lochpaar-Düsen gewährleistet, ohne dabei zu sehr vom Prinzip des Serienmehrlochinjektors und somit von einer realistischen und symmetrischen Innenströmung abzuweichen. Die gruppierte Lochdüse verfügt über Spitzlöcher mit einem Durchmesser von $d_L = 0,121 \text{ mm}$ und wird im Folgenden mit GH121 (**G**roup **H**ole) bezeichnet. Das Spritzlochpaar liegt auf einem Seitenwinkel, die beiden Spritzlöcher haben einen Abstand von $0,654 \text{ mm}$ und sind in einem Winkel von $1,5^\circ$ aufeinander zugeneigt, sodass die Sprays fast parallel aus den Spritzlöchern austreten. Eine Interaktion der Sprays ist aufgrund des geringen Abstands der beiden Spritzlöcher früh möglich. Der theoretische Kollisionspunkt der beiden Sprays, bei Vernachlässigung der Ausbreitung der Sprays, liegt in $24,6 \text{ mm}$ Abstand vom Düsenaustritt. Dies entspricht bei einem PKW-Motor einem typischen Abstand zum Muldenkragen. Die Düse ist so angefertigt, dass das obere Loch des Spritzlochpaares einer Sitzloch- und das untere einer Sackloch-Ausführung entspricht. Die

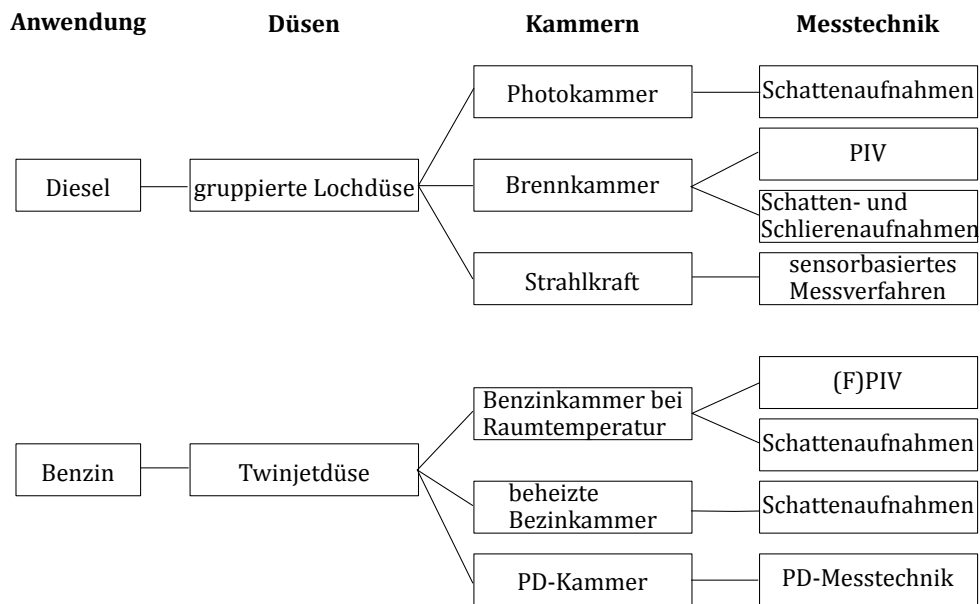


Abbildung 3.1: Übersicht zu der verwendeten Anwendung mit entsprechenden Düsen sowie Versuchsträgern und angewandter Messtechnik

Referenzdüsen werden mit SH (**S**ingle **H**ole) und dem entsprechenden Durchmesser bezeichnet. Es werden sowohl Düsen mit dem gleichen Lochdurchmesser (in Sitz- und Sacklochvariante), als auch mit dem gleichen hydraulischen Massendurchfluss untersucht. Der Winkel zwischen Injektorachse und Sprayachse beträgt für alle Injektoren knapp 80° . Dies ist typisch für Dieselmotoren, da hier in das kleine Restvolumen des Brennraums am oberen Totpunkt eingespritzt wird. Die Brennraumform zu diesem Zeitpunkt wird durch die ω -förmige Mulde im Kolben bestimmt.

Abbildung 3.2 zeigt die schematische Darstellung der Düsen. Neben der gruppierten Lochdüse sind die untersuchten Referenzdüsen dargestellt, die anstelle der drei Spritzlochpaare nur drei Spritzlöcher aufweisen. Oben links ist die gruppierte Lochdüse zu sehen, rechts daneben die Referenzvariante SH171, deren Massendurchsatz dem der gruppierten Lochdüse entspricht. Dafür muss die Gesamtquerschnittsfläche der Spritzlöcher übereinstimmen, woraus sich ein Spritzlochdurchmesser von $d_L = 171 \mu\text{m}$ für die Düse SH171 ergibt. Bei den Düsen SH121 *Sitz* und SH121 *Sack* ist statt des gruppierten Lochpaares der Düse GH121 jeweils nur eines der beiden Spritzlöcher in der entsprechenden Variante realisiert. Die beiden Referenzdüsen, die jeweils nur über einzelne Spritzlöcher mit gleichem Durchmesser ($d_L = 121 \mu\text{m}$) wie die der gruppierten Lochdüse verfügen, sind in der unteren Reihe der Abbildung 3.2 dargestellt. Auf der linken Seite ist die Sitzlochvariante gezeigt, rechts die Sacklochdüse. Weitere Details zu den verwendeten Düsen sind in Tabelle 3.1 zu finden.

Düse	Spritzlöcher	d_L [mm]	Höhenwinkel
GH121	Sitz- und Sackloch	0,121	$78,9^\circ$
SH171	Sackloch	0,171	$79,6^\circ$
SH121 <i>Sitz</i>	Sitzloch	0,121	$78,1^\circ$
SH121 <i>Sack</i>	Sackloch	0,121	$79,6^\circ$

Tabelle 3.1: Eigenschaften und relevante Abmessungen der gruppierten Düse und der untersuchten Referenzdüsen

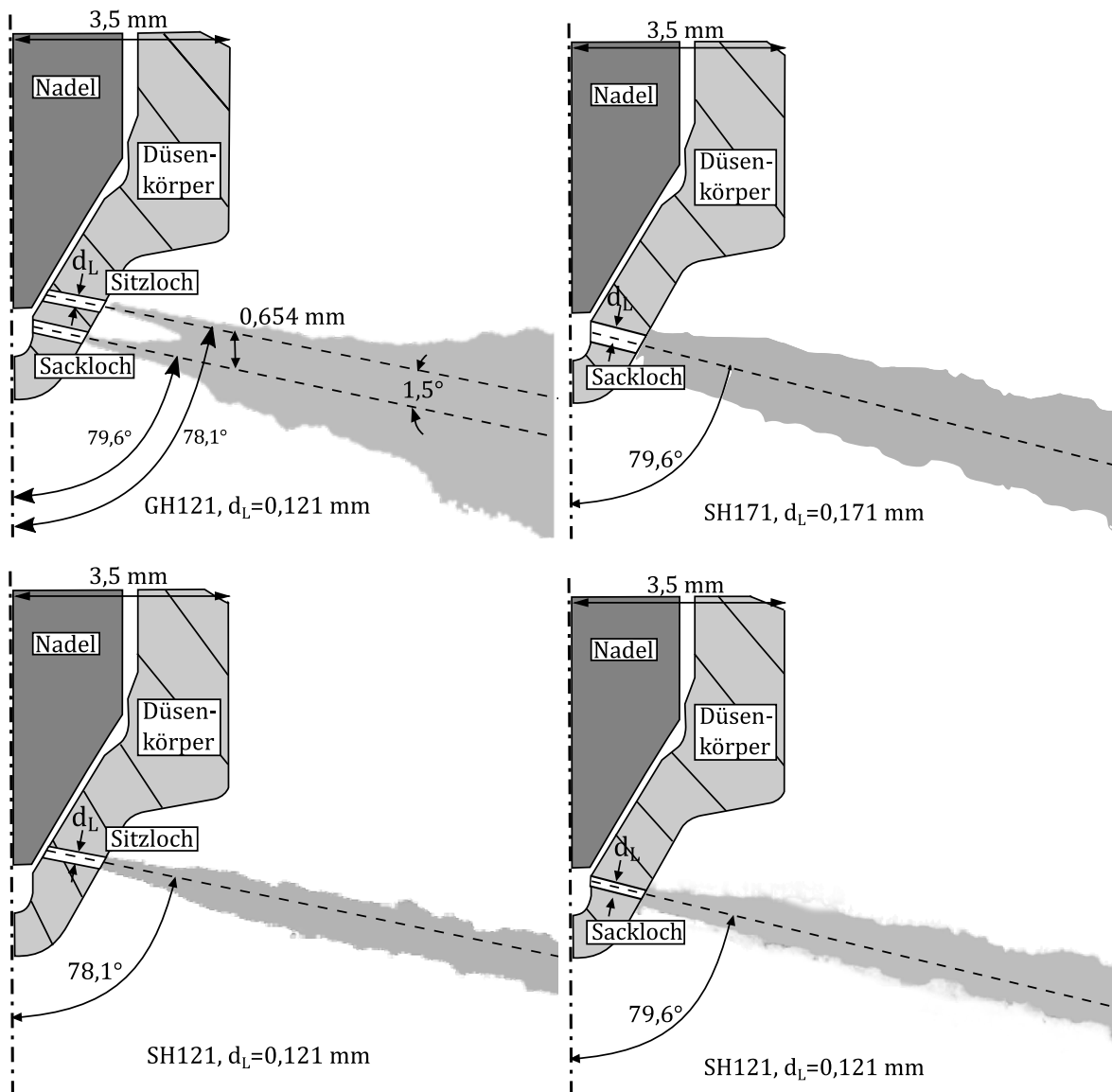


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der gruppierten Lochdüsen links oben (GH121, $d_L = 0,121$ mm), Referenzdüse (SH171) rechts oben ($d_L = 0,171$ mm) und in der unteren Reihe die beiden Referenzdüsen mit geringem Spritzlochdurchmesser (SH121 *Sitz*) links ($d_L = 0,121$ mm) und SH121 *Sack* rechts

Einspritzdruck p_E [bar]	Ansteuerzeit t_A [ms]
400	0,712
1050	0,641
2000	0,698

Tabelle 3.2: Verwendete Einspritzdrücke und Ansteuerzeiten für gruppierte Diesellochdüsen und entsprechende Referenzdüse

Die Einspritzung wurde für drei verschiedene Einspritzdrücke mit den in Tabelle 3.2 dargestellten Ansteuerzeiten untersucht. Die Einspritzdrücke bilden das komplette Spektrum von niedrigen bis hohen Einspritzdrücken und somit auch unterschiedliche Lastbereiche ab.

3.1.2 Benzin - Twinjetdüse

Um verschiedene Aspekte der Prallzerstäubung von Benzinsprays zu untersuchen, wurden drei Twinjetdüsen mit unterschiedlicher Anordnung der Spritzlöcher und eine Referenzdüse zum Vergleich verwendet. Um gute optische Zugänglichkeit zu gewährleisten und trotzdem realistische Innenströmungsbedingungen, die durch das Zusammenwirken mehrerer Spritzlöcher entstehen, zu erlangen, wurden, wie bei den Dieselinjektoren auch, Dreilochdüsen verwendet. Die drei Spritzlochpaare bzw. Spritzlöcher sind gleichwinklig verteilt und haben pro Spritzloch einen Durchmesser von $d_L = 130 \mu\text{m}$. Für die optischen Untersuchungen kann so immer ein Spritzlochpaar freigestellt und ohne Beeinflussung und Beeinträchtigung durch die anderen Sprays untersucht werden. Die verschiedenen Düsen sind in einem Magnet-Hochdruck-Einspritzventil HDEV 5 mit speziellem Schraubverschluss, der den Einbau der verschiedenen Düsenkuppen ermöglicht, verschraubt. Das HDEV 5 verfügt über eine nach innen öffnende Nadel, an deren unterem Ende eine Kugel aufgeschweißt ist, und ist für Einspritzdrücke bis $p_E = 200 \text{ bar}$ ausgelegt. Die für die Benzindirekteinspritzung typischen Vorstufen im Spritzloch fehlen bei den verwendeten Versuchsträgern. Eine Vorstufe, wie sie in konventionellen Düsen verwendet wird, ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Durch die Vorstufe und das damit kürzere Spritzloch wird die Strömung turbulenter und über eine kürzere Strecke geführt. Die Flüssigkeit zerstäubt somit früher und breitet sich weiter aus. Ein weiterer Grund für die Vorstufe ist der Schutz des Spritzlochs. Beläge sollen sich nicht an der Kante bilden, die für das Spray wichtig ist. Die Flamme wird an der Metalloberfläche gequenched und kommt deshalb nicht wirklich in die Vorstufe rein.

Um die verschiedenen Aspekte der Prallzerstäubung durch Kollision zu untersuchen, stehen vier unterschiedliche Düsen zu Verfügung. Drei Twinjetdüsen und eine Referenzdüse, die in Abbildung 3.4 zu sehen sind. Bei den Düsentypen GHA40, GHB30 und GHB40 handelt es sich um Twinjetdüsen (GH = Group Hole, Typ A bzw. B bezeichnet die Anordnung der Spritzlöcher entweder auf einem (A) oder zwei (B) Lochkreisen, mit entsprechendem Kollisionswinkel von 30° bzw. 40° zwischen den beiden Jets), während es sich bei SHB40 um eine Referenzdüse handelt, deren Spritzlöcher wie die äußeren der Düse GHB40 ausgerichtet sind. In der Abbildung 3.4 sind in der oberen Reihe die Twinjetdüsen GHA40 und GHB30 gezeigt, in der unteren Reihe GHB40 und SHB40. Die Abmessungen der vier Düsen sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Bei der Typ-A Düse (GHA40) sind die Spritzlochpaare entlang des Umfangs angeordnet, sie liegen somit alle auf dem selben Höhenwinkel (siehe Ausschnitt in Abbildung 3.4 oben rechts). Die Sicht auf das Spray mit der erwarteten Lamelle für die Typ-A beziehungsweise Typ-B-Düse ist in Abbildung 2.9 skizziert. Die nach der Kollision entstehende Lamelle sollte orthogonal zur Ebene,

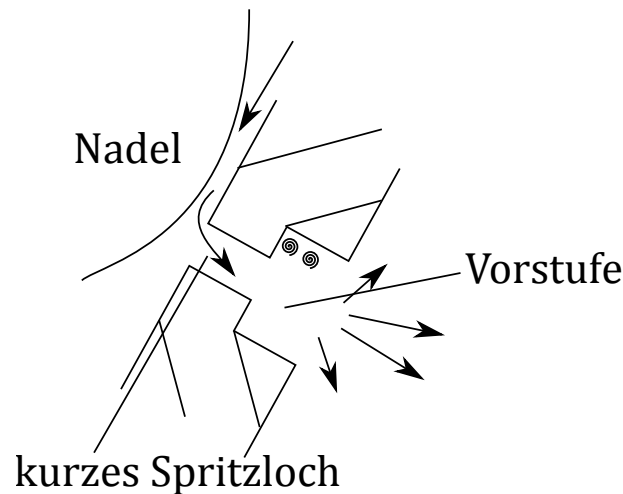


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines Spritzloches einer konventionellen Benzindüse. Das Spritzloch setzt sich aus der Vorstufe und dem eigentlichen kurzen Spritzloch zusammen.

in der die Spritzlöcher angeordnet sind, liegen. Bei den Typ-B Düsen GHB30 und GHB40 sind die Spritzlochpaare sternförmig angeordnet, oberes und unteres Spritzloch liegen auf verschiedenen Höhenwinkeln, wie in Abbildung 3.4 in den Ausschnitten mit Düsenspitze dargestellt ist. Die drei aus Lamellen entstehenden blattförmigen Strukturen eines Typ-B Sprays bilden die Seitenflächen eines Tetraeders. Bei dem Typ-A Spray bilden die drei Blätter einen Stern. Der Kollisionswinkel zwischen den beiden Jets beträgt bei den Düsen GHA40 und GHB40 jeweils $\theta = 40^\circ$, während es bei GHB30 $\theta = 30^\circ$ sind. Die Referenzdüse SHB40 ist baugleich zu der Twinjetdüse GHB40, hat aber nur das jeweils äußere Spritzloch statt eines Spritzlochpaares. Sie verfügt somit im Vergleich zu den Twinjetdüsen nur über die Hälfte des Massendurchflusses.

Düse	Neigung der Sprayachse ψ	Kollisionswinkel θ	d_L [mm]
GHA40	33°	40°	0,13
GHB30	30°	30°	0,13
GHB40	30°	40°	0,13
SHB40	10°	-	0,13

Tabelle 3.3: Relevante Abmessungen der drei Twinjetdüsen und der Referenzdüse

Die Twinjetdüsen werden für Einspritzdrücke von 20 bis 200 bar untersucht, was den typischen Bereich der Benzineinspritzung und zusätzlich geringere, untypisch niedrige Einspritzdrücke von 20 bis 50 bar Einspritzdruck abdeckt. Die Ansteuerzeit wird unabhängig vom Einspritzdruck für die verschiedenen Injektoren gleich gehalten und variiert je nach Experiment zwischen 0,5–1,5 ms. Um die unterschiedlichen Phasen der Kollision beurteilen zu können, wird auf eine Massengleichstellung verzichtet.

3.2 Messtechniken

Um die Sprays detailliert untersuchen zu können und Erkenntnisse zu den physikalischen Vorgängen bei der Interaktion zweier Sprays zu gewinnen, sind verschiedene, sich ergänzende Messtechniken

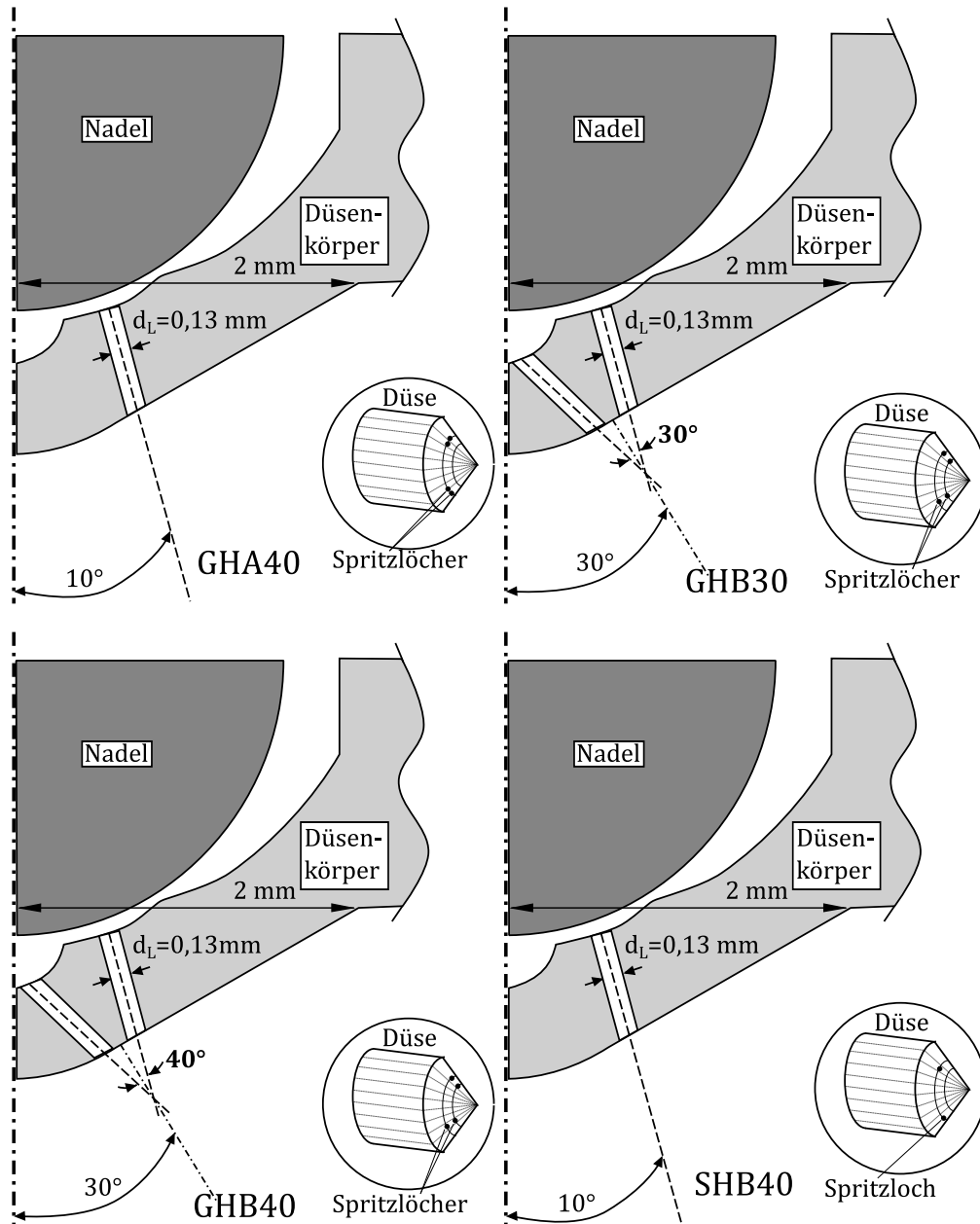
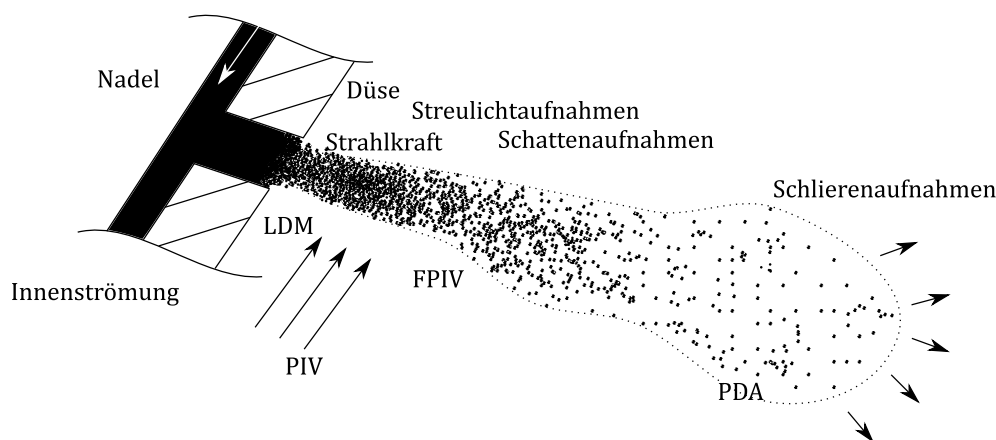


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Twinjetdüsen links oben (GHA40, $d_L = 0,13 \text{ mm}$) und rechts oben (GHB30, $d_L = 0,13 \text{ mm}$), GHB40 links unten, $d_L = 0,13 \text{ mm}$, Referenzdüse (SHB40) rechts unten ($d_L = 0,13 \text{ mm}$). Bei der ersten Twinjetdüse (GHA40) ist nur ein Loch dargestellt, da die Löcher auf einem Umkreis um die Düsen Spitze liegen, wie jeweils in dem Ausschnitt mit der Düsen Spitze zu sehen ist.



klassifizieren, außerdem können Gebiete im Raum identifiziert werden, die bereits von der flüssigen Phase des Sprays erfasst sind.

Lichtstreuung Mehrfachstreuung verfälscht die Aufnahmen von Sprays, sodass gesicherte Aussagen über die innere Struktur des Sprays nur begrenzt möglich sind [16, 17]. Die Bedeutung der Mehrfachstreuung darf keinesfalls unterschätzt werden [60], die Komplexität der Streuung liegt darin, dass gestreute Strahlung nicht verloren geht sondern immer weiter gestreut werden kann. Der gesamte Anteil des gestreuten Lichts steht in Beziehung zu den optischen Eigenschaften des Sprays. Bei optischen *line-of-sight* Messungen wird die verfügbare Information entlang des kompletten Lichtpfads aufintegriert, sodass es zu einer Verfälschung des Messergebnisses durch Mehrfachstreuung kommt. Diese Verfälschung ist am Lichtschnitt noch stärker.

Lichtstreuung an Partikeln Die Intensitätsverteilung des an einem sphärischen Tröpfchen gestreuten Lichts wird durch die Mie-Theorie beschrieben, die eine Lösung der Maxwell-Gleichungen darstellt [84]. Auf welche Weise Licht an Partikeln gestreut wird, hängt stark von dem Verhältnis des Partikeldurchmessers d_p zur Wellenlänge λ ab, das in der Mie-Theorie durch die dimensionslose Kennzahl

$$q = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (3.1)$$

für Flüssigkeitströpfchen, wie z.B. Öl, beschrieben wird. Für sehr kleine Partikel mit $q \ll 1$ kann die Intensitätsverteilung des gestreuten Lichts durch die Rayleigh-Näherung berechnet werden, für $q \gg 1$ gelten hingegen die Gesetze der geometrischen Optik [84]. Für den Bereich $q \approx 1$, in dem zum Beispiel die Tracer der PIV-Messungen liegen, ergibt sich eine komplizierte Verteilung von ungefähr q lokalen Intensitätsmaxima um das Teilchen. Somit ist die Intensität des Streulichtes vom Betrachtungswinkel abhängig. Der durchschnittliche Wert der Intensität skaliert dabei in erster Näherung mit q^2 und für $q \gg 1$ mit dem Verhältnis der Brechungsindizes der Partikel und des Strömungsmediums. Zudem beeinflusst der Brechungsindex das Verhältnis von Reflektion zu Streuung und zu Absorption. Um mit der Kamera ausreichend Signal von den Partikeln zu erhalten, sollten die Partikel daher möglichst groß sein. Um den Wunsch nach gutem Folgevermögen zu realisieren, müssen die Partikel allerdings möglichst klein sein. [84]

Optische Dichte Die Definition der optischen Dichte ist für die Untersuchung von Sprays hilfreich [59], da die Größe die Lichtundurchlässigkeit eines Objektes charakterisiert. Optische Messtechniken beruhen darauf, ein Untersuchungsgebiet auszuleuchten und das aus dem Gebiet auf einen Kamerachip fallende Licht zu analysieren. Optische Messtechniken funktionieren bei geringerer optischer Dichte besser, da weniger Licht auf dem Weg verloren geht. Oberhalb einer gewissen optischen Dichte können optische Messtechniken nicht mehr angewendet werden, da zu wenig Licht am Kamerachip ankommt und das Messsignal im Rauschen untergeht. Beim Durchgang durch ein Objekt wird der Intensitätsverlust eines sich in z -Richtung ausbreitenden Lichtstrahls durch das Lambert-Beer-Gesetz wie folgt in guter Näherung beschrieben

$$I = I_0 \exp \left(- \int \sigma(z) N(z) dz \right). \quad (3.2)$$

$\sigma(z)$ ist dabei der Extinktions-Wirkungsquerschnitt und $N(z)$ die Konzentration der Streuzentren. Die Größe $1/N\sigma$ wird dabei oft als freie Weglänge bezeichnet. [59] Aus voriger Gleichung wird die optische Dichte wie folgt definiert:

$$\tau = -\ln \frac{I}{I_0}. \quad (3.3)$$

Streulichtaufnahmen

Eine einfache Art der photographischen Methoden ist die Streulichtaufnahme. Hierbei wird das Spray mit einer Lichtquelle ausgeleuchtet, das von dem Objekt gestreute Licht wird mit einer Kamera, die in ähnlicher Richtung wie die Lichtquelle platziert ist, aufgenommen. Die so gewonnenen Aufnahmen ermöglichen zum Beispiel eine Klassifikation des Sprays innerhalb verschiedener Zerfallsbereiche und geben an, wie weit sich das Spray bereits ausgebreitet hat. Durch Streulichtaufnahmen können die flüssigen Bereiche detektiert werden, da Dämpfe nur sehr wenig Licht streuen.

Um Bewegungsunschärfe zu vermeiden, muss bei der Aufnahme schnellablaufender Bewegungen, wie die des Einspritzvorgangs, das Zeitfenster der Beobachtung möglichst kurz gehalten werden. Dies kann durch die Verwendung von Kameras mit schnellen Verschlusszeiten oder durch den Einsatz kurzpulsfähiger Lichtquellen erreicht werden. In beiden Fällen muss darauf geachtet werden, dass in diesem kurzen Zeitfenster ausreichend Energie am Detektor ankommt.

Durch den dichten Spraynebel, der zu einer hohen optischen Dichte innerhalb des zu untersuchenden Bereiches führt, kann es bei Streulichtaufnahmen zu Mehrfachstreuung kommen, die bereits in Abschnitt 3.2.1 konkretisiert wurde. Je dichter das Spray, desto höher der Einfluss durch Mehrfachstreuung.

Schattenaufnahmen

Den typischen Versuchsaufbau bei Schattenaufnahmen zeigt Abbildung 3.6. Die Kamera wird direkt von einem Punkt hinter dem Spray beleuchtet, wobei Lichtstrahlen von dem Spray von ihrem eigentlichen Pfad abgelenkt oder absorbiert werden. Hierdurch entstehen Schatten des Sprays, die auf dem Kamerachip registriert werden können. Die Verwendung einer punktförmigen Lichtquelle erfordert wesentlich niedrigere Pulsenergien, als dies bei Streulichtaufnahmen der Fall ist. Durch die inhomogene Dichteverteilung eines Sprays kann ein Schattenmuster aufgenommen werden, mittels dessen Rückschlüsse auf die Struktur des Sprays gezogen werden können. Bei Detailaufnahmen der sich schnell bewegenden Sprays werden daher Schattenaufnahmen gegenüber Streulichtaufnahmen bevorzugt. Häufige Anwendung findet der Aufbau mit parallelem Licht, wodurch ein größerer Messbereich untersucht werden kann, da das Licht gleichförmig in diesem Raum verteilt werden kann.

Schattenaufnahmen sind *line-of-sight* Messtechniken, die Informationen entlang einer Linie auf den Kamerachip projizieren. Die Informationen werden entlang der optischen Achse integriert. Somit sind sie vor allem für die Untersuchung von 2D-Objekten geeignet. Sie werden aber bei Sprays auch verwendet, um 3D-Informationen des Sprays entlang einer Linie zu integrieren und anschließend abzubilden. [95] Schattenaufnahmen werden sehr häufig als Ergänzung zu weiteren Messtechniken verwendet [42, 91, 110]. Sie geben einen ersten Überblick über die Kenngrößen

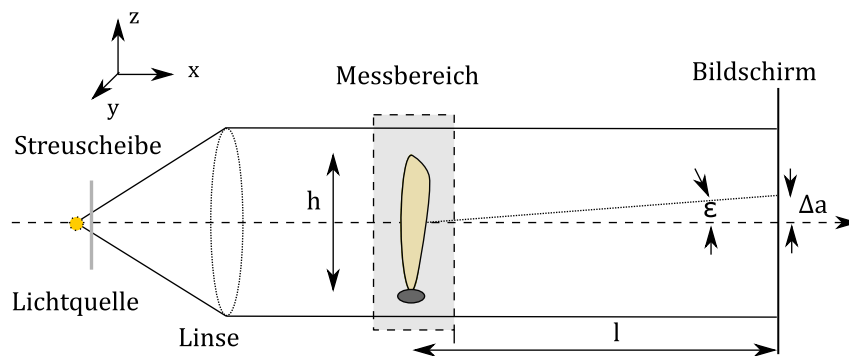


Abbildung 3.6: Linsenbasierter, optischer Aufbau für Schattenaufnahmen mit parallelem Licht durch den Messbereich, Verwendung einer punktförmigen Lichtquelle mit Streuscheibe um den Hintergrund der Aufnahmen zu homogenisieren

von Sprays, dem Kegelwinkel und der Penetration. Es existieren allerdings auch Arbeiten, die zur Untersuchung von Sprays ausschließlich Schattenaufnahmen nutzen [23, 100, 55]. Mit dieser Technik werden sowohl konventionelle Diesel- als auch Benzinsprays untersucht.

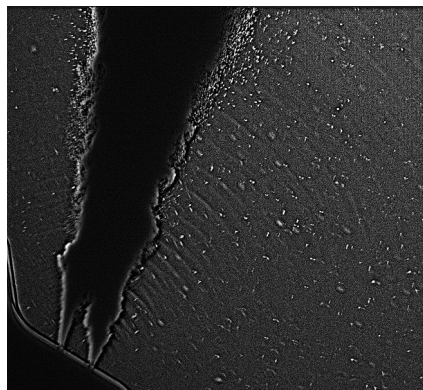


Abbildung 3.7: Durch Schattenabbildungen lassen sich Druckwellen gut darstellen. Um die Druckwellen leichter zu erkennen, wird das gleitende Minimum vom Originalbild abgezogen. Die Messung erfolgt bei Raumtemperatur und einen Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar.

Die Helligkeitsverteilung der Schattenaufnahme ist nach folgender Gleichung definiert [95]

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta a}{d} = \frac{\epsilon \times l}{h}. \quad (3.4)$$

I ist die Lichtintensität, ϵ der Brechungswinkel des Lichts. Die anderen geometrischen Größen sind in Abbildung 3.6 eingetragen. Die Information der betrachteten Größe, bei Schattenaufnahmen die Dichte, wird entlang der betrachteten Bahnlinie des Lichts integriert. Schattenaufnahmen eignen sich, um Schockwellen darzustellen. In Abbildung 3.7 können Schockwellen identifiziert werden, die auftreten, wenn ein Dieselspray in den Raum eindringt. Die Schockwellen scheinen aus Richtung der Spritzlöcher der Düse zu kommen. Durch die gute Zugänglichkeit zur Kammer lassen sich feine Strukturen, wie Schockwellen, darstellen.

Ausreichend zeitliche und räumliche Auflösung vorausgesetzt, können aus Schatten- und auch Streulichtaufnahmen eine Vielzahl makroskopischer Spraygrößen wie Kegelwinkel und Eindringtiefe bestimmt werden. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen werden oft dazu verwendet, Sprays

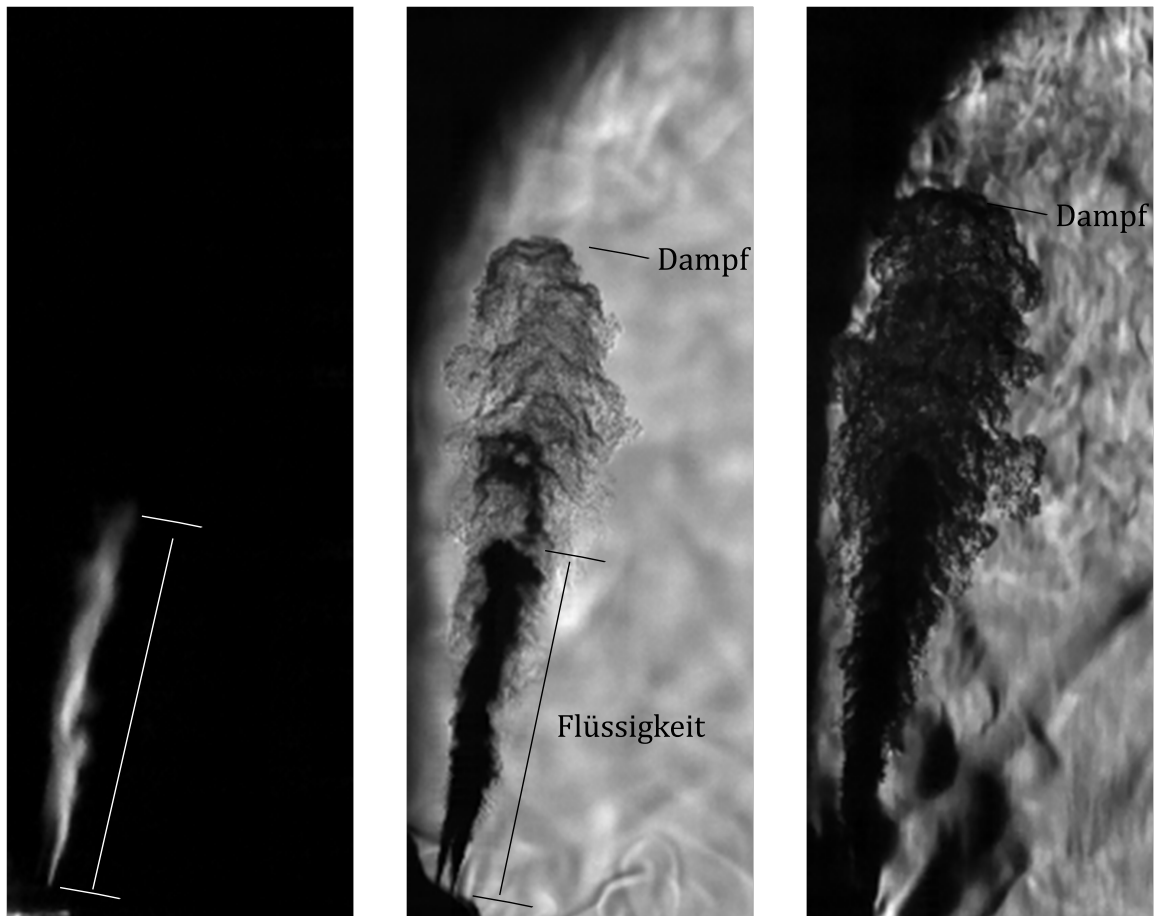


Abbildung 3.8: Streulicht-, Schatten- und Schlierenaufnahme eines Dieselsprays $t_{ASOE} = 0,5$ ms nach Bestromungsbeginn. Randbedingungen für die Aufnahmen: $T = 1000$ K, Einspritzdruck $p_E = 1050$ bar. Größe der Aufnahme $31 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$. Bei der linken Aufnahme wurde das Spray von der Seite beleuchtet, die mittlere und rechte sind bei Hintergrundbeleuchtung aufgenommen.

zu charakterisieren. So kann der Einfluss umgebender Größen auf die Einspritzung untersucht werden. Die Daten können verwendet werden, um detaillierte Modelle zur Abbildung von Sprays zu entwickeln. Streulicht- und Schattenaufnahmen sind eine einfache und robuste Technik und können aus diesem Grund auch unter schwierigen äußeren Bedingungen verwendet werden.

Zur detaillierten Beobachtung von Sprays in Ausschnitten von wenigen Millimetern wird meist ein Aufbau ohne Ausleuchtung mit parallelem Licht verwendet. Die Energie reicht ohne Parallelisierung des Lichtes aus. Das Spray wird direkt beleuchtet, das gestreute Licht wird von der Kamera mit Fernfeldmikroskop direkt aufgenommen.

Schlierenaufnahmen

Eine besondere Art der Schattenaufnahme ist die Schlierenaufnahme, sie ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Der Aufbau gleicht dem parallelem Aufbau der Schattenmesstechnik, allerdings ist eine zusätzliche Schlierenkante eingebaut. Die Technik kann genutzt werden, um sich unterscheidende Gradienten in einem inhomogenen transparenten Medium sichtbar zu machen [95, 105]. Licht,

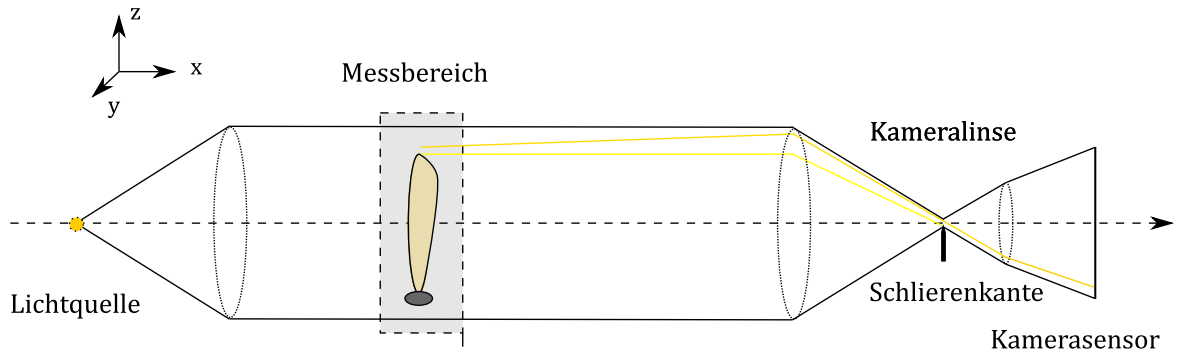


Abbildung 3.9: Linsenbasierter optischer Aufbau für Schlierenaufnahmen mit parallelem Licht durch den Messbereich und Schlierenkante in der zweiten Fokusebene. Der gelbe Strahl wird durch die Schlierenkante abgelenkt, der orange kann passieren.

das durch das zu testende Objekt geht, wird mittels Linsen vor dem Objekt parallelisiert und anschließend fokussiert. Der Aufbau entspricht dem der Schattenaufnahme, ergänzend ist im Fokuspunkt des Lichtes eine Schlierenkante platziert. Eine Abbildung der Lichtquelle wird in der Ebene der Schlierenkante geformt. Die Schlierenkante kann senkrecht zur Ebene des Objekts verschoben werden, die verwendete Lichtquelle ist näherungsweise punktförmig. Sobald die Schlierenkante Teile des Bildes der Lichtquelle wegschneidet, nimmt die Lichtintensität in diesen Bereichen ab.

Durch Dichtegradienten werden Strahlen von ihrem ursprünglichen Weg in unterschiedliche Richtungen abgelenkt. Die Schlierenkante fängt die durch Gradienten abgelenkte Strahlen (gelber Strahl) ab, die Aufnahme wird an dieser Stelle dunkler. Negative Gradienten hingegen (orangener Strahl) lenken den Lichtstrahl etwas von der Kante weg und können ohne Beeinflussung auf dem Schirm erscheinen. Die Schlierenkante muss so positioniert werden, dass ein Teil der Lichtstrahlen abgeschirmt wird, wie im linken Teil von Abbildung 3.10 dargestellt ist [31]. Die Intensitätsverteilung einer Schlierenaufnahme kann anhand der Abbildung ($a \times b$) des Sprays auf der Schlierenkante erklärt werden. Die relative Intensitätsänderung ergibt sich zu $\Delta I/I = \Delta a/a$. Wird die Verschiebung größer $\Delta a > a$, scheitert das Schlierenverfahren (dargestellt in Abbildung 3.10 rechts [95]). Die Helligkeit des Hintergrunds kann über Positionierung der Schlierenkante eingestellt werden. Die relative Intensitätsänderung, die für die homogene, eigentlich nicht eintretende, Verteilung gilt, ergibt sich zu

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{n} \int \frac{dn}{dz} dx. \quad (3.5)$$

Der Brechungsindex n ist für Gase

$$n - 1 \approx K \rho_g, \quad (3.6)$$

hierbei ist ρ_g die Gasdichte und K die *Gladstone-Dale-Konstante*. Für Luft hat die Konstante einen Wert von $2,23 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$. Der Dichtegradient eines Gases kann somit direkt über die Messung der Helligkeit quantifiziert werden.

Eine Schlierenaufnahme der Dieseleinspritzung ist in Abbildung 4.5 rechts dargestellt. Durch die Anwendung der Schlierenmesstechnik kann die Dampfphase des Dieselsprays detektiert werden, die mittels Schatten- und Streulichtaufnahme nur teilweise abgebildet werden kann. Bei

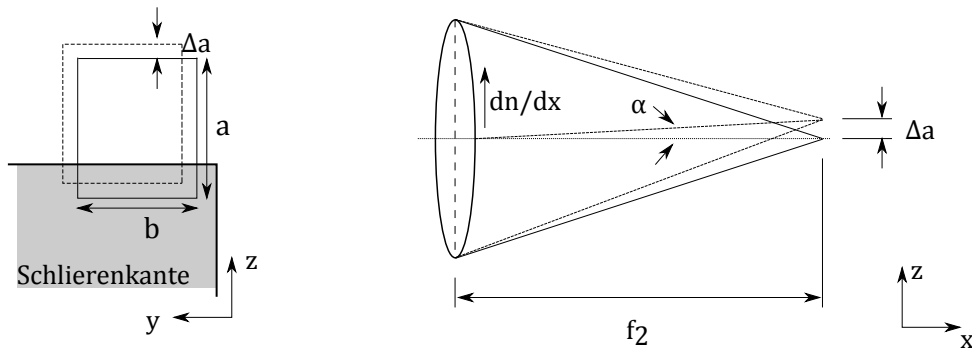


Abbildung 3.10: Skizze der Schlierenkante und der Abbildung des Sprays ($a \times b$) links, Ablenkung eines Lichtstrahls durch Dichteunterschiede rechts, nach [31]

Schattenaufnahmen mit parallelem Licht kann durch Schliereneffekte die Dampfphase weniger intensiv abgebildet werden. Durch Temperatur- und Gasdichtegradienten in der Umgebung des Sprays kommt es auch im Hintergrund zu Schliereneffekten. Dies erschwert die anschließende Separierung des Sprays vom Hintergrund und die folgende Auswertung der Aufnahmen.

PIV

Die *Particle Image Velocimetry* (PIV) wird genutzt, um die Strömung eines optisch nicht transparenten, homogenen Gases oder einer Flüssigkeit darzustellen. Die Technik wurde in den 1980er Jahren als optisches Verfahren zur schnellen quantitativen Erfassung von globalen 2D-Geschwindigkeitsverteilungen in einer Strömung entwickelt. Im Gegensatz zu lokalen Messtechniken ist sie imstande, den gesamten Messbereich auf einmal zu vermessen. [84]

Hierzu wird die Strömung mit Kleinstpartikeln, sogenannten Tracern, dotiert. PIV basiert auf der Messung der Verschiebung der Helligkeitsverteilung kleiner Partikel zweier aufeinanderfolgender Zeitpunkte t und $t' = t + \Delta t$. Die Geschwindigkeitsverteilung wird aus dem Partikelversatz innerhalb eines betrachteten Feldes zwischen den beiden Zeitpunkten ermittelt. Es wird nicht der Versatz von einzelnen Partikeln bestimmt, sondern der einer ganzen Partikelgruppe innerhalb des betrachteten Interrogationsfensters. Dazu wird der Messbereich in n Interrogationsfenster unterteilt, mittels Kreuzkorrelation der Helligkeitsverteilungen beider Aufnahmen wird die Verschiebung $\vec{\Delta x}$ für das i -te Fenster ermittelt, innerhalb der sich die Partikelgruppe in der Zeit Δt bewegt hat, woraus sich der Geschwindigkeitsvektor

$$\vec{u}_i = \frac{\vec{\Delta x}_i}{\Delta t} \quad (3.7)$$

berechnen lässt. Die Funktionsweise von PIV ist schematisch in Abbildung 3.11 skizziert. Das Fluid und die umgebende Gasphase, die mit Tracern dotiert ist, werden in einem Lichtschnitt beleuchtet. Die Tracer sind ausreichend klein, um der Strömung folgen zu können und gleichzeitig groß genug, um ausreichend Licht zu streuen. Um die Partikelbewegung auswerten zu können, sollte die Hauptbewegung der Tracer in der beleuchteten Ebene liegen. Die Laserlichtschnitte werden bei konventioneller PIV in zwei kurzen Zeitabschnitten mittels einer doppelbildfähigen Kamera aufgenommen. Die Geschwindigkeit des Gases, das in das Spray strömt, liegt im Bereich weniger Meter pro Sekunde und ist damit sowohl für Benzin- als auch für Dieselsprays deutlich

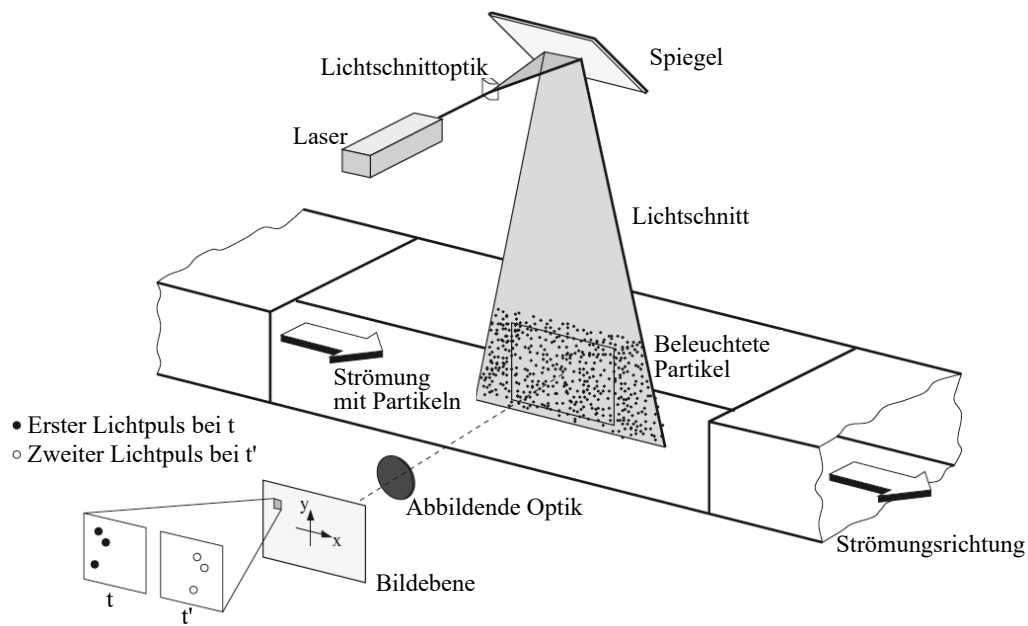


Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau einer PIV-Messung [90]

geringer als die Penetrationsgeschwindigkeit der Sprays. Die Zeitdifferenz zwischen den Bildern muss ausreichend klein gewählt werden, um die Geschwindigkeit der tracerdotierten Strömung auflösen zu können. Ein Teil der Tracer verlässt den Lichtschnitt aufgrund von Geschwindigkeitsanteilen senkrecht zur Lichtschnittebene, was als Fehlerquelle berücksichtigt werden muss. Bewegungsunschärfe in den Aufnahmen wird mittels spezieller Doppelpuls Laser, die für jede Aufnahme einen entsprechend kurzen Laserpuls generieren können, unterbunden.

Micro-PIV Um das Entrainment von Gas in die kollidierenden Twinjetsprays zu charakterisieren, wird im Zuge der Arbeit hochauflösendes PIV verwendet. Es wird vor allem der Nahbereich der Düse betrachtet, in dem die Interaktion stattfindet und in dem sich die interagierenden Sprays von konventionellen Sprays am stärksten unterscheiden. Die Seitenlänge des Messbereichs liegt in einer Größenordnung von 5 – 10 mm. Die dafür notwendige hohe Vergrößerung stellt besondere Anforderungen an die PIV-Messtechnik. Es muss darauf geachtet werden, dass die Dicke des Laserlichtschnittes möglichst gering ist. Hierdurch wird der Fehler von sich normal durch den Lichtschnitt bewegenden Partikeln verringert, es gehen aber auch Partikel verloren, die sich in Strömungsrichtung bewegen. Der Lichtschnitt sollte so dünn sein, dass die Strömung entlang der Dicke des Lichtschnitts homogen ist. Zusätzlich wird durch die hohe Vergrößerung die Tiefenschärfe der Abbildung reduziert. Diese kann bei weit geöffneter Blende geringer werden als die Dicke des Lichtschnitts.

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, skaliert die Intensität des am Partikel gestreuten Lichts mit q^2 und somit auch mit d_p^2 . Während die Tracerpartikel typischerweise einen Durchmesser in der Größenordnung von $d_p = 1 \mu\text{m}$ haben, liegen die Tröpfchengrößen eines Kraftstoffsprays bei 5 – 40 μm . Zudem ist die Tröpfchendichte im Spray viel höher als die Partikeldichte der Tracer im umgebenden Gas. Die Intensität des am Spray gestreuten Lichts ist daher um Größenordnungen höher als das an den Tracern gestreute Licht. Dies wird in Abbildung 3.12 verdeutlicht. Bei Einstellung der Belichtung, unter denen die Tracer gut erkennbar sind, wird das Spray stark

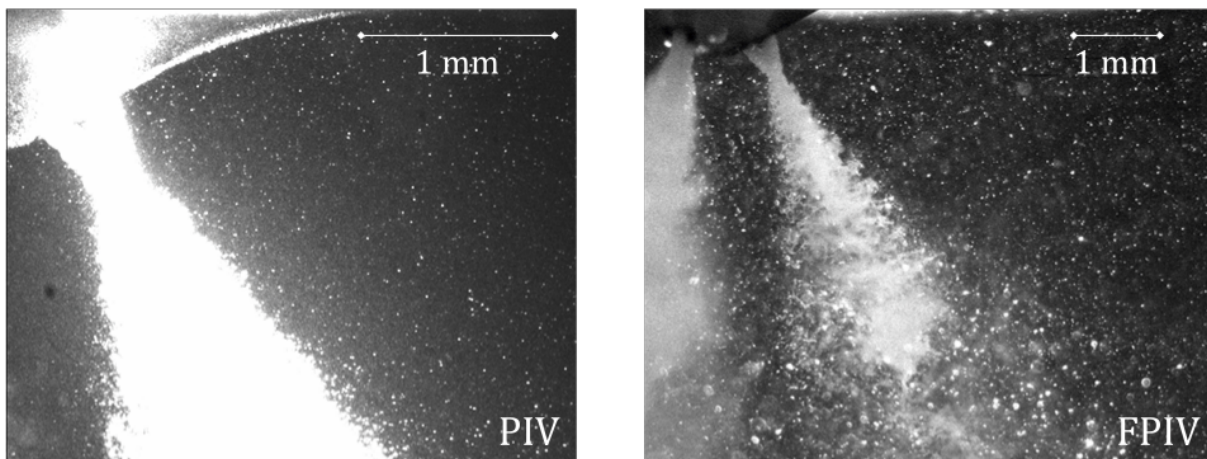


Abbildung 3.12: PIV- und FPIV-Aufnahmen im Nahbereich des Sprays

überbelichtet, sodass Tracer, die sich im Nahbereich des Sprays befinden, kaum zu erkennen sind. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich vom Spray gelöste Kraftstofftröpfchen, oder solche, die von einer vorherigen Einspritzung stammen, ein viel stärkeres Signal verursachen als die eigentlichen Tracer. Dies erschwert vor allem dann die Auswertung, wenn diese Spraytröpfchen eine andere Geschwindigkeit haben als die Gasphase und damit die Tracer. Um diese Probleme zu minimieren, können zwei Möglichkeiten genutzt werden. Zum einen können durch die algorithmische Maskierung Bereiche, die die Auswertung stören, ausgeblendet werden. Im Fall von Sprays genügt es, Pixel oberhalb eines bestimmten Helligkeitsgrenzwertes zu maskieren, da das Spray um ein Vielfaches heller als die Umgebung ist.

FPIV

Die zweite Möglichkeit, die häufig bei Sprays zur Anwendung kommt [90, 25, 70], ist die *Fluorescent Particle Image Velocimetry* (FPIV). Sie ist eine Form der PIV, bei der mit Hilfe eines anregbaren Farbstoffes, der als Tracer genutzt wird, das störende Streulicht eines Sprays durch einen Filter unterdrückt werden kann. Durch den Einsatz fluoreszierender Tracer können Strömungsbewegungen nahe des Sprays ausgewertet und so der Gaseintrag in das Spray genau bestimmt werden. Die Methode basiert auf einer monochromen Laserbeleuchtung. Werden Tracerpartikel eingesetzt, die Licht (auch) in einer anderen Wellenlänge emittieren als das einfallende Laserlicht, kann das Streulicht anhand seiner Wellenlänge durch einen optischen Filter von dem Fluoreszenzlicht der Tracerpartikel getrennt werden. Dies kann durch den Einsatz fluoreszierender Partikel erreicht werden, die ihr Absorptionsmaximum im Bereich der Laserwellenlänge haben, ihr Emissionsmaximum liegt bei größeren Wellenlängen.

In der Arbeit wurden sowohl PIV als auch FPIV Experimente durchgeführt. Abbildung 3.12 zeigt für jede Technik eine Aufnahme. Bei den PIV-Aufnahmen (linke Abbildung) wird deutlich mehr Streulicht vom Spray detektiert, es sind keine Strukturen des Sprays erkennbar. Das Spray erscheint breiter als auf den FPIV-Aufnahmen, bei denen Streulicht mittels Filter blockiert wird. Die Struktur des Sprays und einzelne Tröpfchen sind erkennbar. Für die FPIV Aufnahmen wurde eine wesentlich empfindlichere Kamera verwendet, um das wenige Licht, das den Filter passiert, aufnehmen zu können. Im Nahfeld der Düse sind beide Techniken gut einsetzbar. Je weiter stromabwärts die Messungen durchgeführt werden, desto vorteilhafter ist die Messung mit FPIV,

da sich immer mehr Tröpfchen vom Spray lösen und sich im Randbereich des Sprays bewegen oder sich unter die Tracer mischen. Die PIV- und FPIV-Messungen wurden bei unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt, die Gründe und die genauen Betriebsbedingungen sind im folgenden Abschnitt unter 3.3.4 zu finden.

Hochgeschwindigkeits-PIV Durch die moderne Technik können komplexe und sehr schnelle Vorgänge zeitgenau aufgelöst werden. In der PIV werden Hochgeschwindigkeitslaser und -kameras verwendet, um einen solchen Aufbau zu realisieren. Durch Erhöhen der zeitlichen Auflösung wird der Bereich erreicht, in dem der Zeitabstand zwischen den Aufnahmen gerade ausreichend kurz für eine Verfolgung der Bewegung ist. Die Verwendung einer Doppelbildkamera mit passendem Laser ist in diesem Fall überflüssig. Es genügt ein ausreichend schneller, einfach gepulster Laser in Verbindung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Die Kreuzkorrelation für die PIV-Auswertung wird zwischen den Einzelbildern zweier aufeinanderfolgender Zeitpunkte ausgeführt. Hierdurch ist es möglich, die Gasströmung während des gesamten Vorgangs zu untersuchen.

Eine Charakterisierung der gruppierten Dieselsprays unter motorähnlichen Bedingungen wird im Zuge dieser Arbeit mittels Hochgeschwindigkeits-PIV vorgenommen. Da Einspritzungen hier nur unter hohem zeitlichen Aufwand untersucht werden können, bietet sich dieses System trotz des damit einhergehenden Verlustes an Bildqualität an.

3.2.2 Laser-Doppler-Technik

Die *Laser-Doppler-Technik* (LD) stellt, wie die PIV, ein indirektes Messverfahren dar. Sie wird zur punktuellen Geschwindigkeitsmessung von Gasen und Fluiden verwendet. Die Geschwindigkeitsinformation eines Tröpfchens ist in dessen Streulichtfeld, das mittels Detektoren aufgenommen wird, enthalten. Bei diesem berührungslosen, optischen Messverfahren wird die Geschwindigkeit eines Tröpfchens bestimmt, mit der es sich durch das Messvolumen bewegt. In Flüssigkeiten oder Gasen werden Tracer benötigt, in Sprays sind die benötigten Tröpfchen bereits vorhanden. Die Tröpfchen werden von einem in zwei einzelne kohärente Teilstrahlen aufgeteilten Laserstrahl an deren Kreuzungspunkt beleuchtet. Während sich die Tröpfchen durch das Messvolumen bewegen, erscheint auf dem Detektor ein Streulichtsignal. Die Frequenz des Lichtes, das von Tröpfchen gestreut wird, ist aufgrund des Doppler-Effektes gegenüber der Frequenz des Lasers verschoben. Die Differenz der Dopplerverschiebungen des Streulichtes der beiden Teilstrahlen ist direkt proportional zur Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung [2]. Da sich diese beiden Streulichtanteile im Detektor kohärent überlagern, wird dort ein Signal mit der Differenz registriert.

Phasen-Doppler-Technik Die *Phasen-Doppler-Technik* (PD) ist eine Erweiterung der im vorherigen Abschnitt beschriebenen LD-Technik [2, 104]. Neben der Tröpfchengeschwindigkeit im Spray kann simultan auch der Durchmesser sphärischer homogener Tröpfchen bestimmt werden, die sich durch das Messvolumen bewegen [30]. So können die beiden wichtigsten Kenngrößen von Tröpfchen innerhalb eines Sprays bestimmt werden. Hohe Genauigkeit und eine sehr hohe räumliche Auflösung können mittels Phasen-Doppler-Messtechnik erreicht werden. Bei der Punktmesstechnik ist das Messprinzip das gleiche wie bei der LD. Die Geschwindigkeit der Tröpfchen wird über die Frequenzänderung des Lichtes bestimmt, das an dem sich durch den Kreuzungspunkt der Laserstrahlen bewegendem Tröpfchen gestreut wird. Um den Durchmesser der Tröpfchen zu bestimmen, wird der Effekt ausgenutzt, dass Streulicht, das von zwei verschiedenen Beobachtungsrichtungen empfangen wird, eine Phasendifferenz besitzt, die proportional

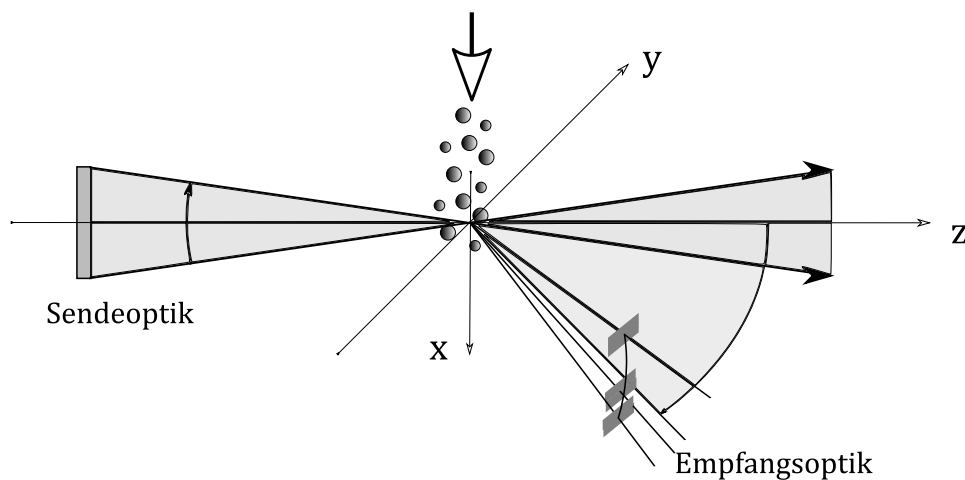


Abbildung 3.13: Schematische Skizze eines Phasendopplersystems zur Bestimmung der Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung und des Tröpfchendurchmessers, nach [105]

zum Durchmesser des Tröpfchens ist. Das Licht wird an bestimmten Punkten der Oberfläche der Tröpfchen, sogenannten *glare points*, gestreut und von verschiedenen Detektoren aufgenommen. Der Abstand dieser Glanzpunkte skaliert mit dem Tröpfchendurchmesser und findet sich ebenfalls in der Phasenverschiebung wieder. Der optische Aufbau beider Techniken ist sehr ähnlich, die LD wird um einen Laser und einen zusätzlichen Detektor ergänzt (Abbildung 3.13) [105]. Für die Messung sind die folgenden Punkte zu beachten [8]:

- Eine korrekte Ermittlung des Durchmessers der Tröpfchen ist nur für sphärische, homogene Tröpfchen möglich. Optische Messmethoden können nur Informationen über Punkte liefern, die mit Licht interagieren. Eine Bestimmung der Form und Struktur inhomogener oder nicht-sphärischer Tröpfchen ist wegen der limitierten Anzahl an *glare points* an der Tröpfchenoberfläche nahezu unmöglich. [2]
- Die Größe der Tröpfchen sollte im Bereich von Mikro- bis Millimetern liegen. Der Messbereich hängt von verschiedenen Faktoren wie der Leistung des Lasers, der Platzierung der Empfängeroptik sowie vom Signalprozessor ab.
- Das Signal-Rausch-Verhältnis des empfangenen Lichtes wird durch Mehrfachstreuung vermindert.
- Die Tröpfchenkonzentration im Spray sollte nicht zu hoch sein. Bei zu hoher Konzentration steigt die Wahrscheinlichkeit der Mehrfachstreuung und ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis ist zu erwarten. Der Messpunkt sollte bei dichten Sprays daher in ausreichendem Abstand vom Düsenaustritt sein.

Einsetzbarkeit von optischen Messtechniken an Sprays

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Kraftstoffe Benzin und Diesel sowie die sich unterscheidenden Einspritzdrücke und Strategien lassen eine optische Untersuchung der Sprays nur zum Teil und in bestimmten Bereichen zu. Die optische Dichte hängt stark von der Position ab, zusätzlich haben äußere Bedingungen einen Einfluss auf die Qualität der optischen Messtechniken. Dieselsprays haben vor allem durch den höheren Einspritzdruck eine höhere optische Dichte.

Messtechniken, die bei geringer optischer Dichte besser funktionieren (LD, PD, LCV), lassen sich daher einfacher an Benzinsprays anwenden. Die Phasen-Doppler-Messungen werden deshalb nur an Benzinsprays angewendet. Hier muss ein Mindestabstand in Höhe von $z = 30\text{ mm}$ von der Düsen Spitze gewählt werden, da sonst keine verlässlichen Ergebnisse erzielt werden können. Bei beiden Spraytypen können mittels Streulicht-, Schatten- und Schlieren-Messtechnik sowohl das ganze Spray als auch einzelne Bereiche detailliert untersucht werden. Informationen zu Kegelwinkel und Eindringtiefe lassen sich auch aus Aufnahmen von optisch dichten Sprays auswerten. Die innere Struktur eines Sprays kann nur an optisch weniger dichten Stellen charakterisiert werden. Sobald die Umgebungsbedingungen verändert werden und der Umgebungsdruck und die Umgebungstemperatur steigen, wird die Auswertung der aus optischer Messtechnik gewonnener Aufnahmen zunehmend schwieriger. Effekte wie Beam-steering machen eine Auswertung zum Teil sehr aufwändig und kompliziert. Der PIV sind vor allem durch die starke Streuung des Lichtes am Spray und durch die genannten schwieriger auswertbaren Aufnahmen bei motorähnlichen Bedingungen Grenzen gesetzt.

Durch den Einsatz verschiedener Messtechniken können die Sprays auf verschiedene Weisen untersucht werden, sodass sich eine komplette Information zur Interaktion der Sprays ergibt. Die optisch dichteren Dieselsprays werden wegen schwieriger Zugänglichkeit zusätzlich mit einem sensorbasierten Messverfahren untersucht.

3.2.3 Sensorbasierte Messverfahren

Durch die Verwendung eines piezoelektrischen Sensors innerhalb eines Sprays kann die Kraft, die vom Spray auf einen Pin des Sensors ausgeübt wird, gemessen werden. Durch die zeitliche Aufnahme der Kraft kann eine Aussage über das Penetrationsverhalten getroffen werden. So begünstigt ein hoher Impuls eine weite Penetration. Die Impulsverteilung gibt darüber hinaus Auskunft über die Sprayform in der betrachteten Ebene.

Wirkt eine Kraft, vorzugsweise senkrecht, auf den piezo-elektrischen Sensor, so bewirkt dies eine Verformung der Kristalle und eine elektrische Ladung wird abgegeben. Dabei ist die auf den Sensor ausgeübte Kraft proportional zu der sich ergebenden Ladung. Die Kraft $F = d(m_{fu})/dt \approx \dot{m}_{fu}$ ¹, die auf der Pinoberfläche gemessen wird, ist die Summe der Anteile aus dem Tröpfcheneinfluss und des dynamischen Drucks aufgrund des mitgerissenen Gasstroms innerhalb des Sprays. Der exakte Wert ist vom Umlenkungswinkel der Tröpfchen und vom Strömungsfeld, das den Sensor umgibt, abhängig. Der Impuls des Sprays, der in dieser Arbeit ermittelt wird, entsteht durch Integration des zeitaufgelösten Kraftsignals $p = \int F(t)dt$.

Neben dem Gesamtsprayimpuls kann auch die innere Struktur des Sprays aufgelöst werden. Zu diesem Zweck wird ein flacher Sensor, deutlich kleiner als die relevanten Dimensionen des Sprays, verwendet. Der Sensor wird auf den verschiedenen Ebenen durch das Spray bewegt. Aus einer Vielzahl von Einspritzungen und der Mittelung wird die Impulsverteilung Punkt für Punkt „konstruiert“. Die Sprayausbreitung über eine größere Fläche in weiteren Abständen von der Injektoraustrittsebene resultiert in geringeren Spitzenwerten der gemessenen Kraft. Ein signifikanter Anteil des gemessenen Kraftsignals stammt von dem eingezogenem Gas, das Druckschwankungen und Wirbel aufweist, die durch die Ablenkung des Sprays am piezo-elektrischen Sensor entstehen [83].

¹für ein „stationäres“ Spray kann der Term \dot{m}_{fu} vernachlässigt werden

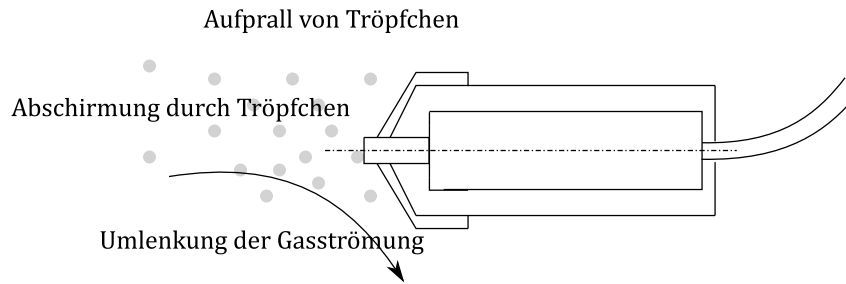


Abbildung 3.14: Schematische Skizze eines Strahlkraftsensors mit möglichen wirkenden Effekten (Aufprall von Tröpfchen, Umlenkung der Gasströmung, Abschirmung durch Tröpfchen)

Für Strahlkraftmessungen wird in der Regel ein Pin mit einem Durchmesser von $d = 2\text{ mm}$ verwendet. Für die Untersuchungen der gruppierten Lochdüse wird dieser allerdings durch einen kleineren Pin mit einem Durchmesser von $d = 0,5\text{ mm}$ ersetzt, der entlang eines feinen Gitters mit einer Auflösung von $0,5^\circ$ in radiale und tangential Richtung (axial 1 mm) bewegt wird. Die Notwendigkeit eines guten Signal-zu-Rausch-Verhältnisses limitiert die Anwendung der Strahlkraftmesstechnik mit dem kleinen Sensor auf den Nahbereich der Düse ($r < 20\text{ mm}$). Die normalerweise für Strahlkraftmessungen vorausgesetzte Annahme, dass im Nahbereich das gesamte Spray auf den Sensor trifft, darf nicht auf den kleinen Pin übertragen werden. Abbildung 3.14 fasst die möglichen Effekte, die bei der Messung in einem Spray mit einem Sensor auftreten können zusammen.

3.3 Druckkammern

Für die Untersuchung interagierender Sprays mittels optischer und sensorbasierter Messtechnik stehen verschiedene Druckkammern zur Verfügung. Die Untersuchung in Druckkammern bietet die Vorteile stationärer Bedingungen sowie optisch einfacher Zugänglichkeit zur Untersuchung der komplexen Vorgänge der Zerstäubung. Je nach zu untersuchender Eigenschaft können sowohl Kammern bei Raumtemperatur als auch beheizte Kammern genutzt werden. Die Kammern werden, je nach Messtechnik, passend ausgewählt. Über die Veränderung des Drucks und der Temperatur können motorähnliche Bedingungen nachgestellt werden.

3.3.1 Photokammer (Diesel)

Um Sprays optisch genauer analysieren zu können, werden Messungen in gut zugänglichen Druckkammern durchgeführt. Die Messbedingungen der Kammer sind leichter zu kontrollieren als im Motor. Die Gasdichte der Kammer kann mit der eines Dieselmotors gleichgestellt werden. So können die grundlegenden Wirkzusammenhänge bei sehr guter optischer Zugänglichkeit untersucht werden. In der Photokammer kann die Einspritzung von Dieselinjektoren in Stickstoffatmosphäre untersucht werden. Die Kammer hat drei große Scheiben aus Quarzglas, sodass das Betrachten des Gesamtsprays aus der Front- und das des Einzelsprays aus der Seitenansicht möglich ist. Die Kammer kann zur Gleichstellung der Motorgasdichte mit einem Druck von bis zu 50 bar befüllt werden, die Messungen in der Photokammer werden üblicherweise aber bei einem Gegendruck von 20 bar durchgeführt. Die Kammer wird mit einem leichten Stickstoffstrom durchspült, um Verschmutzungen auf der Scheibe zu vermeiden und Tröpfchen von vorherigen Einspritzungen aus der Kammer zu entfernen. Da die Durchspülung alleine für die detaillierten Untersuchungen

des Sprays aus der Seitenansicht nicht ausreichend war, wurden zusätzlich noch zwei Bleche verwendet, die die anderen beiden Sprays von der optischen Achse weglenken. Als Kraftstoff dient Prüföl, das kontinuierlich auf 40 °C erhitzt ist. Die Kraftstoffversorgung wird mittels Pumpe und Prüfbank mit einer Drehzahl von 1000 1/min bereitgestellt.

Schattenaufnahmen Sowohl Schattenaufnahmen des gesamten Sprays als auch des Nahbereichs von Dieselsprays werden in der Photokammer aufgenommen. Hierfür wird der in Abbildung 3.6 dargestellte Aufbau verwendet. Lichtquelle, Linsen, Druckkammer und Kamera befinden sich auf einer Linie. Als Lichtquelle dient ein gepulster Diodenlaser, der inkohärentes, monochromatisches Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 810 \text{ nm}$ emittiert (Cavilux HF). Speckles und chromatische Aberration können so vermieden werden. Mit einer Pulsdauer von $t = 50 \text{ ns}$ kann die Bewegungsunschärfe vernachlässigbar gering gehalten werden. Die Sequenzen werden mit einer hochauflösenden Kamera aufgenommen (16 bit, 2560×2160 Pixel, sCMOS, doppelbildfähig). In den Nahfeldaufnahmen wird ein Bereich von $6 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ mit einem Long Distance Microscope betrachtet, in den Fernfeldaufnahmen ein Bereich von $25 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, der die gesamte Einspritzung abdecken kann. Pro Einspritzung wird eine Aufnahme gemacht, der Zeitpunkt der Aufnahme wird dabei von Einspritzung zu Einspritzung leicht verschoben. Zusätzlich werden für ausgesuchte Zeitpunkte 50 Aufnahmen gemacht, um die statistischen Fluktuationen des Einspritzprozesses erfassen zu können.

3.3.2 Brennkammer

Die Brennkammer ermöglicht die Nachbildung realistischer thermodynamischer Bedingungen für die Dieseleinspritzung. Diese werden mit Hilfe einer Vorverbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff, die unmittelbar vor der Einspritzung erfolgt, erreicht. Mit dem verwendeten Aufbau können Temperaturen bis 1200 K und Gasdichten bis zu 25 kg/m^3 erreicht werden. Der Einspritzzeitpunkt wird mittels eines Drucksensors festgelegt. Eine Gasmischanlage befüllt die Kammer mit Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff, deren Partialdrücke über die Steuersoftware in Abhängigkeit der gewünschten thermodynamischen Randbedingungen berechnet werden. Dieses Gasgemisch wird von einer in der Kammer integrierten Zündkerze gezündet, wodurch Druck und Temperatur in der Kammer schnell ansteigen. Durch die Abgabe von Wärme an die Kammerwände fallen Gastemperatur und damit auch Druck schnell wieder auf den Anfangswert ab. Druck und Temperatur sind dabei zueinander proportional, da das Volumen konstant ist. Sobald eine vorher bestimmte Druckschwelle unterschritten wird, wird der Einspritzvorgang über die Software getriggert. Abbildung 3.15 zeigt die Druckverläufe für verschiedene Betriebspunkte in der Brennkammer. Je nach Partialdrücken der Gasmischung kann sowohl der Kammerdruck als auch die Gasdichte während der Einspritzung in einem großen Bereich variiert werden. Es sind Drücke bis 200 bar bei verschiedenen Gasdichten einstellbar. Über die Zustandsgleichung ergeben sich Spitzentemperaturen von 2200 K. Der Sauerstoffanteil, der nach der Vorverbrennung in der Kammer verbleibt, kann zwischen 0 – 25 % variiert werden. Somit können Bedingungen geschaffen werden, bei denen die Verdampfung des Sprays in der Kammer ohne eine „Störung“ durch Zündung und Verbrennung beobachtbar ist und solche, bei denen der Dieseldraftstoff zündet. Eine detaillierte Übersicht zu den Funktionen der Brennkammer kann in [1] gefunden werden.

Die Kammer bietet durch ein großes Fenster vorne und zwei kleinere an den Seiten gute optische Einblickmöglichkeiten auf das Spray. Der Injektor ist an der Rückseite der Kammer befestigt. Um zu verhindern, dass der bei der Wasserstoffvorverbrennung entstehende Wasserdampf auf den

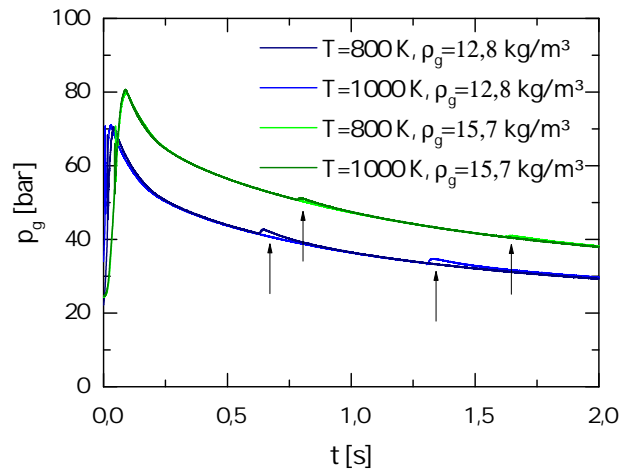


Abbildung 3.15: Druckverlauf in der Brennkammer ab dem Zeitpunkt der Zündung der Vorverbrennung für vier verschiedene Betriebspunkte (1,2,4 und 5). Der Zeitpunkt der Einspritzung ist jeweils mit einem Pfeil markiert. Für gleiche Gasdichte stimmen die Druckverläufe gut überein.

Scheiben kondensiert und den Einblick erschwert, verfügt die Brennkammer über eine elektrische Heizung, welche die Temperatur der Kammerwände und -scheiben $T = 458 \text{ K}$ hält.

Betriebspunkt	Gasdichte $\rho_g [\text{kg/m}^3]$	Gastemperatur $T_g [\text{K}]$	$p_g [\text{bar}]$	% O_2
1	12,8	800	32	3
2	12,8	1000	40	3
3	12,8	900	36	3
4	15,7	800	39	3
5	15,7	1000	49	3

Tabelle 3.4: Untersuchte Betriebspunkte für die Dieseleinspritzung in der Brennkammer

Die Kraftstoffversorgung des Injektors erfolgt über ein Rail mit Druckregelventil, um einen stabilen Einspritzdruck zu gewährleisten. Der Kraftstoffdruck im Rail wird von einem Druckübersetzer bereitgestellt, der Druckluft in bis zu 4000 bar hydraulischen Druck übersetzen kann. Der Injektor wird dauerhaft auf 373 K gekühlt. Als Kraftstoff wird Diesel verwendet. Der Sauerstoffanteil für die Befüllung wird mit $< 5\%$ jeweils so gewählt, dass nach der Wasserstoffvorverbrennung nicht mehr ausreichend Sauerstoff zum Zünden des Diesels vorhanden ist. Um verschiedenste Einflüsse auf die interagierenden Sprays der gruppierten Lochdüse zu untersuchen, wurden Messungen bei zwei Gasdichten (12,8 und 15,7 kg/m³) und drei Gastemperaturen (800, 900 und 1000 K) durchgeführt. Eine Übersicht zu den untersuchten Betriebspunkten gibt Tabelle 3.4 wieder.

Schatten- und Schlierenaufnahmen Schatten- und Schlierenaufnahmen wurden in der Brennkammer mittels Hochgeschwindigkeitskamera und einer Beleuchtung durch die Cavilux HF realisiert, der Aufbau wurde auch an der Photokammer verwendet (verwendeter Bildausschnitt für Gesamtaufnahmen des Sprays: 14 mm \times 31 mm). Um den Nahbereich der Sprays charakterisieren zu können, wird das Infinity K2 Long Distance Microscope mit dem CF2 Aufsatz verwendet. Der

betrachte Bildausschnitt bei Detailaufnahmen hat eine Größe von $5\text{ mm} \times 18\text{ mm}$. Die Aufnahmen der Sprays erfolgen ebenso wie die Aufnahmen in der Photokammer von der Seite, um einen detaillierten Einblick auf den Interaktionsbereich der beiden Sprays zu bekommen.

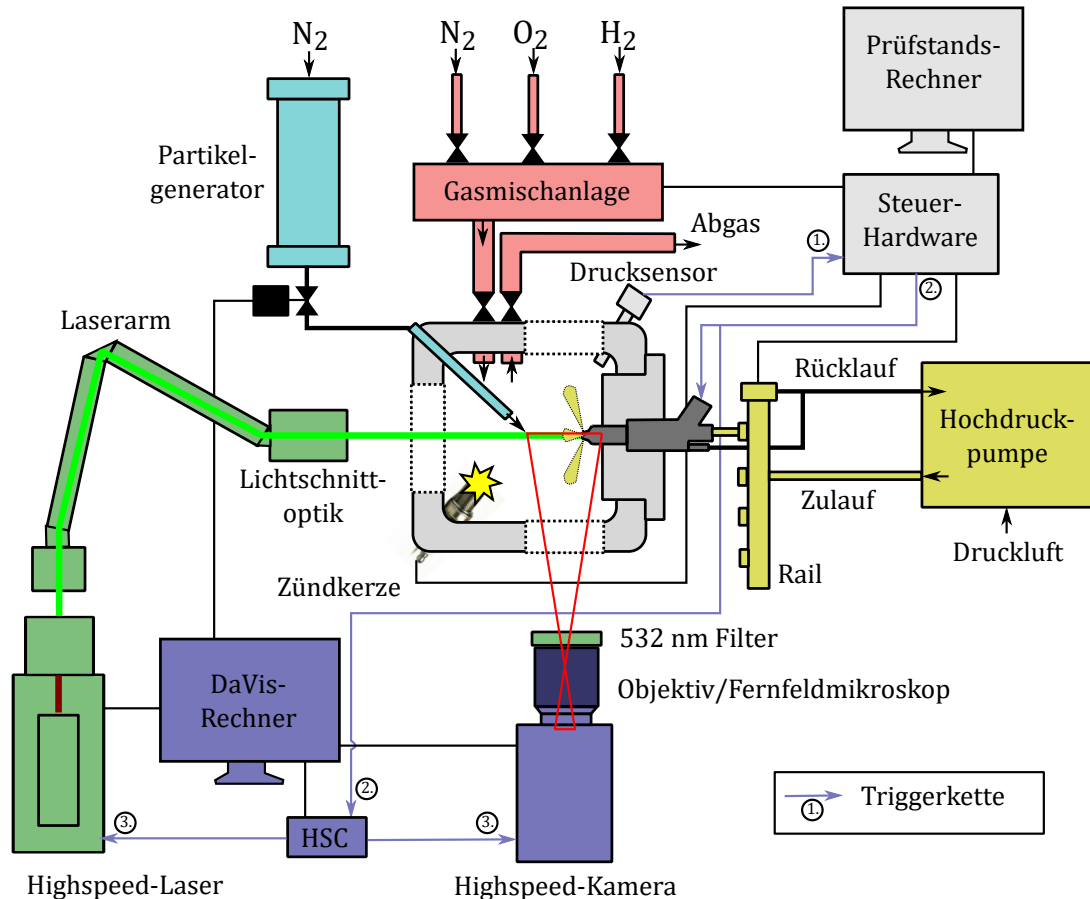


Abbildung 3.16: Schematische Darstellung der Brennkammer mit Hochgeschwindigkeits-PIV Aufbau. Der Laserlichtschnitt wird von vorne in die Kammer eingekoppelt, die Aufnahme eines einzelnen Sprays erfolgt von der Seite.

PIV Der Hochgeschwindigkeits-PIV-Aufbau der Diesel-Brennkammer ist in Abbildung 3.16 dargestellt. Der in der Kammerrückwand eingebaute Injektor ist gedreht, sodass ein Spritzloch(-paar) in der Symmetrieebene der Kammer nach oben zeigt. Der Laserlichtschnitt wird von vorne in die Kammer eingebracht und entsprechend ausgerichtet, dass das nach oben gerichtete Spray beleuchtet wird. Die Kamera wird vor einem Seitenfenster positioniert und so eingestellt, dass die Düsenspitze und das nach oben gerichtete Spray auf dem Bildausschnitt zu sehen sind. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit des umgebenden Gases muss das Gas mit feinen Partikeln dotiert werden, die aufgrund ihres Folgeverhaltens die Gasgeschwindigkeit annehmen. Dazu werden die Tracerpartikel aus einem Partikelgenerator direkt in den Bereich der Düse eingebracht. Zur Beleuchtung der Tracerpartikel wird ein Nd : YVO₄ Hochgeschwindigkeits-Lasersystem bei einer Pulsrate von 20 kHz verwendet. Die Lichtstrahlen passieren einen Frequenzverdoppler, durch den eine Wellenlänge von 532 nm in den ausgehenden Strahlen resultiert. Die beiden Strahlen werden vor der Kammer in ein ca. 1 mm breites Lasersheet geformt. Aufgrund der hohen Temperaturen und Drücke in der Kammer werden feste, chemisch inerte Partikel als Tracer verwendet.

Einspritzdauer	2,5 ms
Einspritzdruck und Bestromungsdauer	$p_E = 400 \text{ bar}, t = 0,712 \text{ ms}$ $p_E = 1050 \text{ bar}, t = 0,641 \text{ ms}$ $p_E = 2000 \text{ bar}, t = 0,698 \text{ ms}$
Lichtschnittbreite	0,2 mm
Kamera	Auflösung 512×512 Pixel Farbtiefe 12 bit
100 mm-Zeiss-Objektiv	Gesamtaufnahme Messbereich $28,16 \text{ mm} \times 28,16 \text{ mm}$ Auflösung $55 \mu\text{m}/\text{Pixel}$
K2 Fernfeldmikroskop CF1 Linse	Nahaufnahme Messbereich $15,36 \text{ mm} \times 15,36 \text{ mm}$ Auflösung $30 \mu\text{m}/\text{Pixel}$
Laser	Nd : YVO ₄ Pulsabstand 0,05 ms (40 Bilder) Pulsdauer 40 ns nominelle Leistung 17 W
Seeding	TiO ₂ , $d = 0,3 \mu\text{m}$

Tabelle 3.5: Eigenschaften und relevante Größen des Hochgeschwindigkeits-PIV-Messsystems

Um ein gutes Folgeverhalten bei gleichzeitig ausreichendem Streulicht zu gewährleisten, wurde Titandioxid (TiO₂, mittlerer Partikeldurchmesser $d = 0,3 \mu\text{m}$) als Tracer ausgewählt. Flüssige Tracer, die für die Untersuchungen des Twinjetsprays (vergleiche Abschnitt 3.3.4) verwendet werden, würden verdampfen oder gar verbrennen. Die Eigenschaften und relevanten Größen des Hochgeschwindigkeits-PIV-Systems sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst. Bei den PIV-Messungen trat teilweise starkes *beam-steering* auf. Das bedeutet, dass Lichtstrahlen durch Gasschichten mit unterschiedlicher Dichte und damit unterschiedlichen Brechungsindizes n unregelmäßig abgelenkt werden, sodass in der Sensorebene der Kamera keine scharfe Abbildung mehr entstehen kann. Dies war insbesondere bei Messungen mit hohen Temperaturen von $T_g = 1000 \text{ K}$ der Fall, bei denen die Einspritzung bereits 0,8 s nach der Vorverbrennung erfolgt und die Atmosphäre in der Kammer noch sehr inhomogen ist. Der Effekt wird durch die hohe Vergrößerung des Fernfeldmikroskops verstärkt. Dazu kommt auch eine Ablenkung des Laserlichtschnitts selbst, der dadurch teilweise nicht mehr in der Schärfenebene liegt. Die Auswertung der Bilder war in den meisten Fällen trotzdem möglich, die Qualität der Ergebnisse wurde jedoch oft beeinträchtigt.

3.3.3 Strahlkraft

Um die Eigenschaften des optisch sehr dichten Dieselsprays auch im Inneren untersuchen zu können, werden neben der optischen Messtechnik auch sensorbasierte Messverfahren angewandt. Mittels optischer Messtechnik kann nur die äußere Form des Sprays abgebildet werden. Durch das sensorbasierte Verfahren kann die Struktur im Inneren des Sprays sowie der Kraftverlauf ermittelt werden. Dafür handelt es sich aber um ein invasives Verfahren.

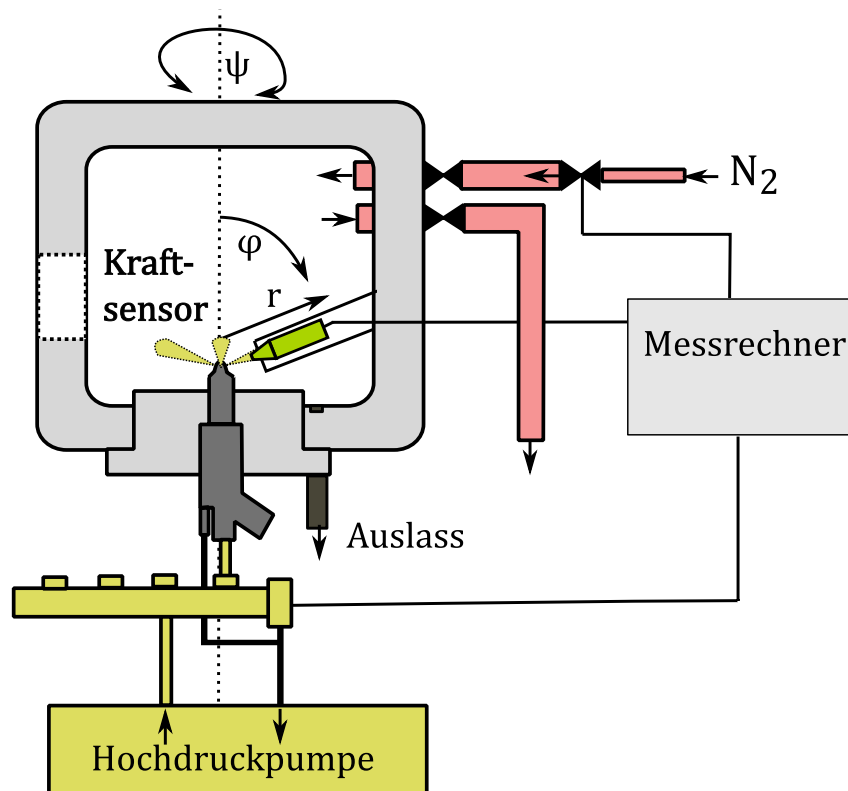


Abbildung 3.17: Skizze der Strahlkraftanlage mit relevantem Koordinatensystem

Die Strahlkraftanlage ist eine Hochdruckkammer, die bis auf einen Gegendruck von bis zu $p_E = 25$ bar ausgelegt ist, was der typischen Gasdichte eines Dieselmotors entspricht. Die Kammer kann mit Stickstoff befüllt bei Raumtemperatur ($T = 298$ K) betrieben werden. Ein piezoelektrischer Sensor kann frei positionierbar durch das Spray verfahren werden und so zeitlich aufgelöst die Verteilung der Kraft im Spray darstellen. Der Messgrößenaufnehmer kann in verschiedenen Abständen r von der Injektorachse ($4 \text{ mm} \leq r \leq 100 \text{ mm}$) positioniert werden. Die Kammer und der Sensor werden um den Injektor bewegt, der von unten in der Kammer montiert ist, sodass eine 360° -Abbildung des Sprays möglich ist. Hierbei können verschiedene Höhen (ϕ)- und Seitenwinkel (ψ) eingestellt werden. Da die Schuss-zu-Schuss Schwankungen der Strahlkraft zu hoch sind, um die Daten einer einzelnen Einspritzung auswerten zu können, werden für jede Position 20 Einspritzungen zeitlich aufgelöst aufgenommen und gemittelt. Die örtliche Verteilung des Sprays wird durch die Bewegung des Sensors innerhalb einer Ebene mit konstantem Abstand r von der Injektorachse ermittelt. Die Kraftstoffversorgung entspricht dem in der Photokammer (vgl. Abschnitt 3.3.1) verwendeten System. Es können Einspritzdrücke bis $p_E = 2000$ bar realisiert werden. Abbildung 3.17 zeigt das Schema der um den Injektor frei beweglichen Strahlkraftanlage.

Bei Anwendung des Standardverfahrens ist die Sensoroberfläche größer als die horizontale Ausbreitung des Sprays. Zur detaillierten Auflösung des Sprayimpulses der interagierenden Sprays wird deshalb ein Pin verwendet, dessen Oberfläche kleiner als die horizontale Ausbreitung des Sprays ist. Die Separierbarkeit der beiden Einzelsprays kann so in den verschiedenen betrachteten Abständen realisiert werden.

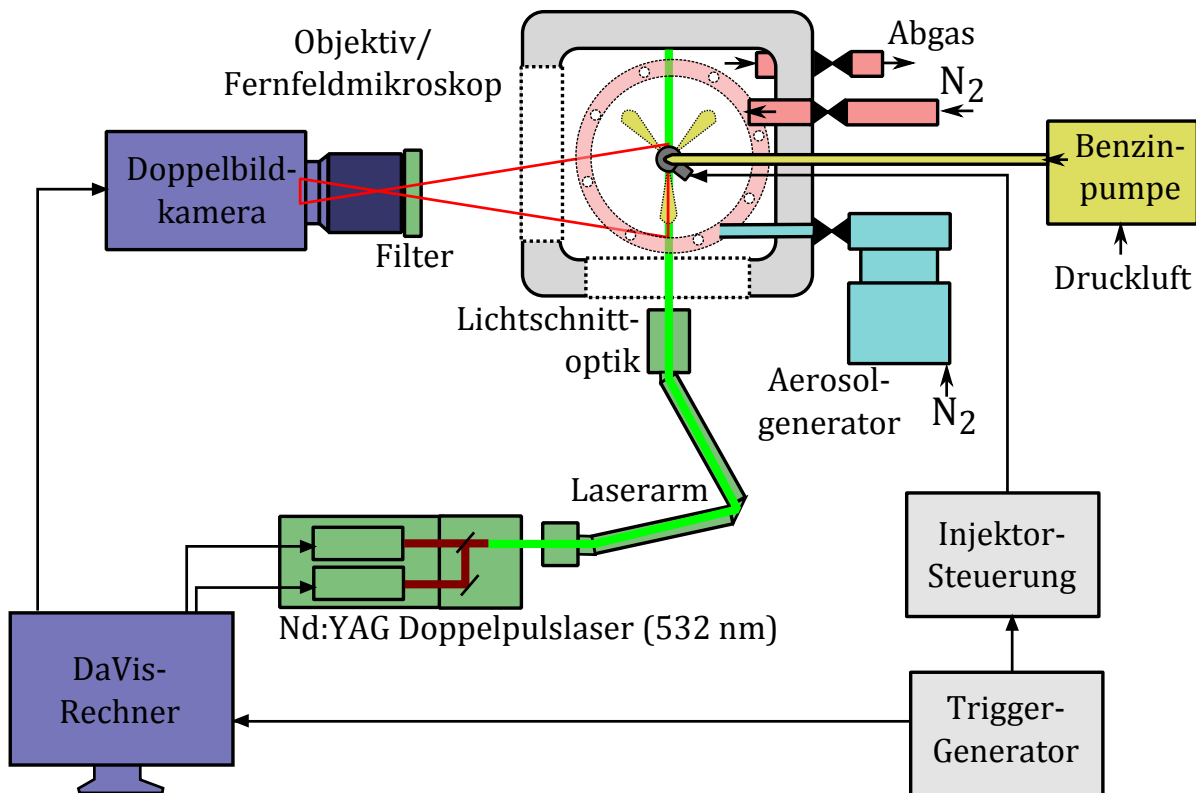


Abbildung 3.18: PIV-Messsystem an der Benzinkammer

3.3.4 Benzinkammer bei Raumtemperatur

Die Benzinspraykammer hat durch Glasscheiben an drei Seiten einen guten optischen Zugang. An der Oberseite wird der Injektor über einen angepassten Flansch montiert. Zusätzlich befinden sich an der Oberseite der Kammer Anschlüsse, einerseits, um die Kammer mit Stickstoff zu befüllen, und andererseits, um einen Partikelgenerator für die PIV-Messtechnik anschließen zu können. Die Kammer kann bei Drücken von 0,1 – 10 bar Gegendruck betrieben werden, entweder mit geschlossenen Ventilen oder kontinuierlich durchspült. Zur Erzeugung des Unterdrucks ist eine Vakuumpumpe angeschlossen. Die Kraftstoffversorgung des Injektors erfolgt über einen Druckübersetzer, der Einspritzdrücke bis zu 300 bar umsetzen kann.

Schattenaufnahmen Um grundlegende Erkenntnisse zu geometrischen Größen von Sprays zu bekommen, wurden Hochgeschwindigkeits- und hochauflösende Aufnahmen der Sprays realisiert. Als Lichtquelle dient in beiden Fällen ein gepulster HF Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 810 \text{ nm}$. Für Aufnahmen im Nahbereich der Sprays wird ein Infinity K2 Fernfeldmikroskop verwendet, das zu einem Bildausschnitt von $3,2 \text{ mm} \times 3,2 \text{ mm}$ führt. Bewegungsunschärfe wird hier, wie auch bei den Schattenaufnahmen von Dieselsprays, durch eine sehr kurze Belichtungsdauer von 50 ns vernachlässigbar gering. Für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wird eine Kamera verwendet, die bei voller Auflösung ($1024 \times 1024 \text{ Pixel}$) mit einer Aufnahmerate von 20 kfps eingesetzt wird. Für die hochauflösenden Aufnahmen wird eine CCD Kamera mit einer Auflösung von $1280 \times 1024 \text{ Pixel}$ verwendet.

(F)PIV Für die Untersuchungen an der Benzin-Spraykammer wurde ein klassischer PIV-Aufbau mit Doppelbildkamera und Doppelpulslaser, mit einem feinen Tröpfchennebel (Zentralhydrauliköl, Durchmesser $\approx 1 \mu\text{m}$) als Tracer, verwendet. Eine Übersicht über den schematischen Aufbau ist in Abbildung 3.18 dargestellt, Tabelle 3.6 gibt einen Überblick über die relevanten Größen. Als Lichtquelle dient ein Nd:YAG-Doppelpuls-Laser BigSkyLasers CFR400. Zur Erzeugung eines Lichtschnitts in der Kammer wird eine LaVision-Lichtschnittoptik verwendet, die aus einer Zylinderlinse mit einer Brennweite von $f = 1000 \text{ mm}$ und einer verschiebbaren sphärischen Linse besteht, mit der der Lichtschnitt fokussiert werden kann. Bei guter Fokussierung konnte eine Lichtschnittbreite von $0,5 \text{ mm}$ realisiert werden. Der in die Kammer eingekoppelte Lichtschnitt wird von einer senkrecht positionierten Kamera aufgenommen. Mittels Palas-Aerosolgenerator werden die Tracer in die Kammer gebracht.

Für die PIV-Experimente mussten je nach verwendetem Seeding (PIV bzw. FPIV) leicht unterschiedliche Bedingungen gewählt werden. Die Messungen fanden am gleichen Versuchsträger statt. Für das konventionelle PIV wurden die besten Ergebnisse bei geschlossener Kammer und einem Umgebungsdruck von $p_g = 2 \text{ bar}$ erzielt. Bei den FPIV Messungen (Rhodamin in Propylenkarbonat) wurde die Kammer bei einem Gleichgewichtsdruck von $p_g = 1,2 \text{ bar}$ kontinuierlich durchspült, da bei geschlossener Kammer keine zufriedenstellende Verteilung der Tracer erreicht werden konnte. Die Unterschiede im Gegendruck werden als akzeptabel eingestuft, da dieser nur einen geringen Einfluss auf die Geschwindigkeit des in das Spray einströmenden Gases hat [88, 7]. 50 Bildpaare werden für jeden Betriebspunkt aufgenommen und zur Auswertung gemittelt.

3.3.5 Beheizte Benzinkammer

Die beheizte Benzinkammer unterscheidet sich zu der im vorherigen Abschnitt 3.3.4 dargestellten Benzinkammer bei Raumtemperatur durch die Möglichkeit der Erhitzung des durch die Kammer strömenden Gases. Das Gas (Stickstoff) kann bei geringer Durchströmungsgeschwindigkeit in der Kammer bis zu einer Temperatur von 650 K erhitzt und bis zu einem Gegendruck von $1 - 7 \text{ bar}$ befüllt werden. Um die Temperatur konstant zu halten, wird eine geringe Durchströmung von $20 \text{ norm-m}^3/\text{h}$ gewählt. Die Kraftstoffversorgung des Injektors erfolgt über einen Druckübersetzer, der Einspritzdrücke bis zu 300 bar realisieren kann.

Schattenaufnahmen Um das Spray unter verdampfenden Bedingungen charakterisieren zu können, werden die Twinjetsprays genauso wie die Dieselsprays mittels Schattenaufnahmen untersucht. Es erfolgt ein Aufbau wie in Abbildung 3.6 dargestellt. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit einer Rate von 20 kHz bei einer Auflösung von $1024 \times 1024 \text{ Pixel}$ werden zur Aufnahme des Gesamtsprays genutzt. Die Einspritzung ist für alle Einspritzdrücke auf eine Zeitdauer von $t_A = 1000 \mu\text{s}$ festgelegt. Zur Auswertung werden 50 Aufnahmen pro Betriebspunkt zur Kompensierung statistischer Fehler gemittelt. Die Aufnahmen des gesamten Sprays umfassen einen Bereich von $22,5 \times 22,5 \text{ mm}$, die des Nahfeldes $7 \times 7 \text{ mm}$. Die Aufnahmen im Nahbereich wurden, wie bei der Photokammer bereits aufgeführt, mittels Fernfeldmikroskop aufgenommen.

3.3.6 Phasen-Doppler-Kammer

Die Kammer für die Phasen-Doppler-Technik entspricht der Benzinkammer, die bei Raumtemperatur betrieben werden kann. Um den speziellen Anforderungen der Phasen-Doppler-Messtechnik

	PIV	FPIV
Aufnahmen pro BP	50	
Bestromungsdauer Injektor	0,5 ms	
Einspritzdruck	$p_E = 10 \text{ bar}$ $p_E = 20 \text{ bar}$ $p_E = 30 \text{ bar}$ $p_E = 50 \text{ bar}$ $p_E = 100 \text{ bar}$ $p_E = 200 \text{ bar}$	
Kamera	LaVision Flowmaster 3 1280 Pixel \times 1280 Pixel Quanteneffizienz $\geq 40\%$	PCO Sensicam qe 1376 Pixel \times 1040 Pixel Quanteneffizienz 60%
50 mm-Zeiss-Objektiv	Gesamtaufnahme Messbereich 48,5 mm \times 38,8 mm Auflösung 38 μm /Pixel $\Delta t = 100 \mu\text{s}$	
K2 Fernfeldmikroskop CF2	Nahaufnahme Messbereich 3 mm \times 2,5 mm Auflösung 2,4 μm /Pixel $\Delta t = 50 \mu\text{s}$	
Lichtschnittbreite	0,5 mm	
Laser	Nd:YAG Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ Pulsdauer 8 ns Leistung 200 mJ $p_E = 50 \text{ bar}$	
Seeding	Zentralhydrauliköl, $d = 1 \mu\text{m}$	Rhodamin-B, $d = 1 \mu\text{m}$
Umgebungsbedingungen	$p_g = 2 \text{ bar}$ $T = 290 \text{ K}$ geschlossene Kammer	$p_g = 1,2 \text{ bar}$ $T = 290 \text{ K}$ offene Kammer

Tabelle 3.6: Eigenschaften und relevante Größen des (F)PIV-Messsystems. Gleichen sich die Größen für PIV und FPIV Messungen sind diese nur unter PIV dargestellt.

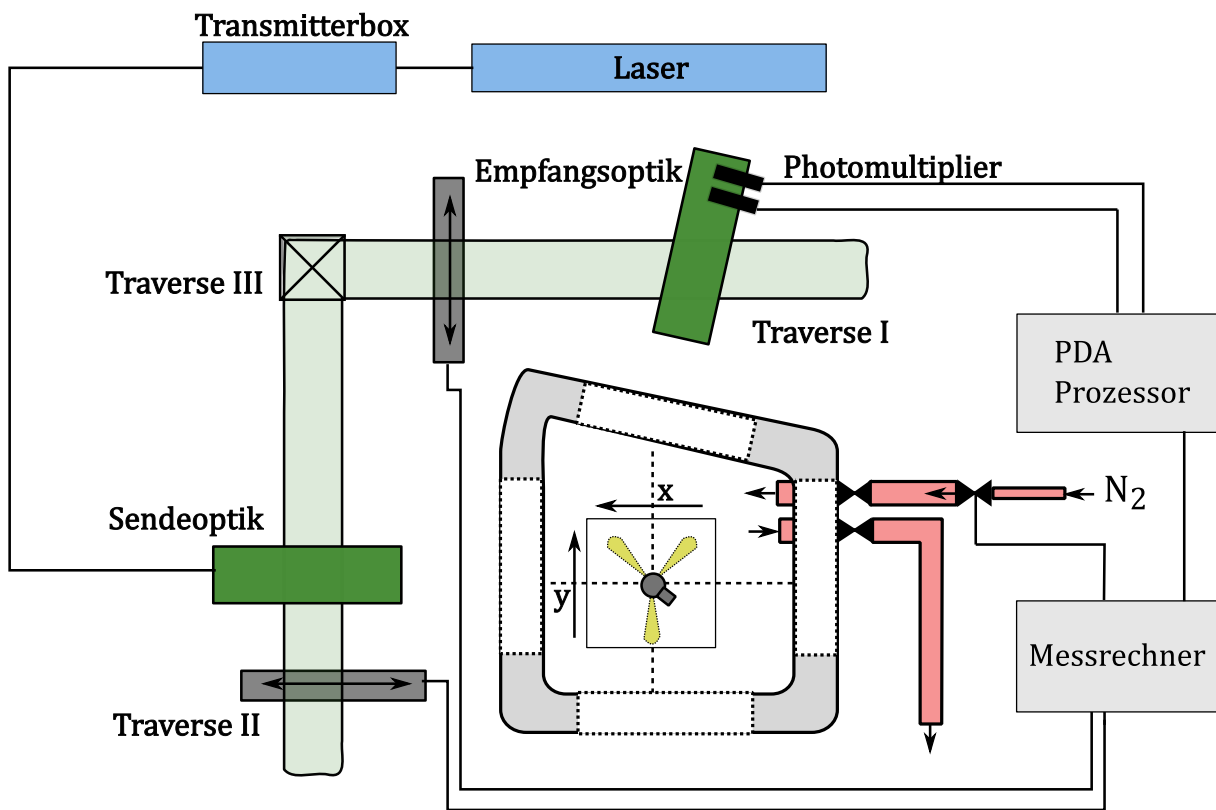


Abbildung 3.19: Phasen-Doppler Messsystem mit relevantem Koordinatensystem

nachzukommen, ist eine Seite der Kammer entsprechend dem gewählten Streuwinkel von 70° gedreht. Über die Kraftstoffversorgung können Einspritzdrücke bis $p_E = 350$ bar realisiert werden. Der Injektor wird von oben in der Kammer montiert, die Ausrichtung kann variabel eingestellt werden. Um die Tröpfchen der vorherigen Einspritzungen aus der Kammer zu transportieren, wird die Kammer kontinuierlich mit einem schwachen Volumenstrom von $41/\text{min}$ bei einem Gegendruck von $p_g = 1$ bar durchspült.

Phasen-Doppler-Messtechnik Wie Abbildung 3.19 dargestellt, besteht das Messsystem aus einer Sende- und Empfangsoptik sowie aus einem Signalprozessor mit Auswerteeinheit. Der Schnittwinkel der Laserstrahlen und somit die Einstellung des Messbereichs wird durch die Sendeoptik vorgegeben. Die Empfangsoptik, die im Streuwinkel der Flüssigkeit n-Heptan zur Sendeoptik positioniert ist, projiziert das aufgenommene, von Partikeln gestreute Licht auf drei Photomultiplier. Sende- und Empfangsoptik sind auf einem beweglichen Traversensystem montiert, das jeden Punkt im Spray automatisch anfahren kann. Es wird ein sogenanntes DPSS (Diode Pumped Solid State)-System mit einer Wellenlänge von $\lambda = 488,2\text{ nm}$ beziehungsweise $\lambda = 513,6\text{ nm}$ mit jeweils einer Leistung von $P = 1000\text{ mW}$ verwendet. Als Ersatzkraftstoff dient n-Heptan, das einen Brechungsindex von 1,39 aufweist, der Streuwinkel von 70° wird gewählt, da er für Tröpfchen mit $n = 1,39$ günstig ist. Das Messvolumen hat eine Größe von $0,05\text{ mm} \times 0,05\text{ mm} \times 0,39\text{ mm}$. Der Durchmesserbereich, der aufgenommen werden kann, liegt zwischen $0,1 - 40,3\text{ }\mu\text{m}$.

Einspritzung	120 Mal ($t_{\max} = 30$ s) oder maximal 10.000 Tröpfchen
Einspritzdauer	$t = 1,5$ ms
Einspritzdruck	$p_E = 20$ bar $p_E = 50$ bar $p_E = 100$ bar $p_E = 200$ bar
Empfangsoptik	Fiber Phasen-Doppler-Messtechnik 112 mm Brennweite Empfangslinse 310 mm Durchmesserbereich 0,1 – 40,3 μm
Kraftstoff	n-Heptan
Laser	$\lambda = 514,5$ nm, $P1000$ mW $\lambda = 488,0$ nm, $P1000$ mW
Messabstand von der Düsen spitze	$z = 30$ mm $z = 50$ mm
Messvolumen	$dX = 0,05$ mm $dY = 0,05$ mm $dZ = 0,39$ mm
Sendeoptik	Brennweite Frontlinse 310 mm Strahlabstand 37,48 mm Strahldurchmesser 2,2 mm
Streuwinkel	70°
Taktrate	4 Hz
Umgebungsbedingungen	atmosphärische Bedingungen $T = 290$ K $p_g = 1$ bar

Tabelle 3.7: Eigenschaften und relevante Größen des Phasen-Doppler-Messsystems

Für die Messungen an den Twinjetsprays wird ein Phasen-Doppler-System des Herstellers DantecDynamics verwendet. In zwei verschiedenen Abständen vom Düsenaustritt wird die komplette Ebene mit einer Schrittweite von einem Millimeter vermessen. Die Abstände liegen bei 30 und 50 mm, da bei kürzerer Distanz das Spray zu dicht und die Tröpfchen noch nicht unbedingt sphärisch sind. Pro Punkt werden höchstens 120 Einspritzungen (maximale Aufnahmedauer: 30 Sekunden) oder maximal 10.000 Tropfen vermessen. Die Dauer einer Einspritzung beträgt $t = 1,5$ ms. Je nach vermessenem Spray variiert die Fläche der gemessenen Ebene. Die Messungen erfolgen unter atmosphärischen Bedingungen, bei einer Kraftstofftemperatur von $T_f = 290$ K und einem Gegendruck von $p_g = 1$ bar. Die untersuchten Einspritzdrücke reichen von 20 bis 200 bar. Die relevanten Größen und Eigenschaften sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst.

Interagierende Sprays I - fast parallele Sprays

Kapitel vier beginnt mit einem allgemeinen Überblick zur Motivation und zur Beschreibung der Interaktion zweier fast paralleler, leicht aufeinander zugeneigter Dieselsprays, gefolgt von einem Überblick zum Stand der Forschung. Es schließt sich eine Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse zur Interaktion der beiden fast parallelen Sprays im Vergleich zu Referenzdüsen an. Es werden Referenzdüsen mit dem gleichen hydraulischen Durchfluss, mit dem selben Spritzlochdurchmesser sowie den selben Anordnungen der Spritzlöcher betrachtet. Die Erkenntnisse zum Airentrainment und zur Impulsbetrachtung wurden im Rahmen zweier Masterarbeiten [52, 68] gewonnen und als Konferenzbeitrag veröffentlicht [44].

4.1 Motivation, Beschreibung, Stand der Forschung

Motivation In Dieselmotoren hängen die Effizienz der Verbrennung und auch die entstehenden Emissionen stark von der Zerstäubung, der Verdampfung und der Gemischbildung im Brennraum ab. Um diese weiter optimieren zu können, werden verschiedene bereits gewonnene Erkenntnisse genutzt. Der Vorteil kleiner Düsenspritzlöcher ist gut dokumentiert: Durch kleinere Tröpfchen, die während des Primärzerfalls entstehen, wird weniger Zeit benötigt, um ein zündfähiges Gemisch zu erhalten [10]. Das Verhältnis zwischen Airentrainment und Einspritzrate des Kraftstoffs ist für einen geringeren Spritzlochdurchmesser höher [94]. Jedoch nimmt die Penetration der Sprayspitze mit dem Spritzlochdurchmesser ab [106, 64], was vor allem bei Volllast problematisch ist, da die Gemischbildung in der Nähe der Zylinderwände verlangsamt abläuft [56] und sich ein stark inhomogenes Gemisch bildet. Bergstrand *et al.* zeigen, dass durch Düsen mit kleineren Spritzlöchern die Verbrennung verbessert wird und somit der Verbrauch geringer ist [15]. Allerdings ist auch die Einspritzrate geringer. Dies kann nur teilweise über höhere Einspritzdrücke oder mittels Optimierung der Einspritzstrategie kompensiert werden [64]. Bei Teillast kann das Verhältnis zwischen Entrainment- und Einspritzrate erhöht werden, wodurch weniger Zeit benötigt wird, um ein zündfähiges Gemisch zu erhalten. Bei Volllast ist eine schnelle Penetration zur Nutzung des kompletten Brennraums Grundlage einer effizienten Verbrennung. Um die beiden divergenten Ziele kleine Spritzlöcher bei Teillast und große Spritzlöcher bei Volllast zu kombinieren, wurde das Konzept der gruppierten Lochdüsen vorgebracht: individuelle große Spritzlöcher werden durch Paare von nahe beieinander gelegenen, fast parallelen, aber kleineren Spritzlöchern ersetzt. Durst *et al.* [28] zeigt für Wasser und Glycerol den Zusammenhang, dass der Tröpfchendurchmesser proportional zum Spritzlochdurchmesser ist.

Es wird erwartet, dass eine Reduzierung des Spritzlochdurchmessers die Kraftstoffzerstäubung, Gemischbildung und Verdampfung verbessert und dass der Impuls des Sprays durch die eng

beieinander liegenden Spritzlöcher zusätzlich eine hohe Penetration sicherstellt. Nach der Theorie der Fluidodynamik ist diese Annahme zulässig, da der Impuls von Jets, die aus einem Paar von Löchern kommen, größer ist, als der eines einzelnen Jets aus einem der beiden Löcher, wenn beide Löcher in einem geringen Winkel aufeinander zugeneigt sind [113]. Das Verhalten der gruppierten Lochdüse wird zwischen dem der Referenzdüse mit gleichem Durchmesser und der mit gleichem hydraulischen Durchfluss liegen. Ziel ist es, die Details zu untersuchen.

Beschreibung Die Interaktion der beiden einzelnen Sprays soll die Spraypenetration bei Volllast auf ausreichend hohem Niveau halten und die Gemischbildung bei Teillast verbessern. Im Detail sollen durch die kleineren Spritzlöcher kleinere Tröpfchen entstehen und sich jedes Spray im Windschatten des anderen ausbreiten, sodass Penetration und Sprayimpuls vergrößert werden [113]. Die Verteilung des Impulses und das Verhältnis Impuls/Fläche sind hierbei von besonderem Interesse. Nach der Interaktion der beiden Einzelsprays wird vom resultierenden Spray das gleiche Verhalten erwartet wie von einem konventionellen Spray mit größerem Lochdurchmesser, infolge der kleineren Spritzlöcher und erwartungsgemäß kleineren Tröpfchen jedoch mit vorteilhaftem Primärzerfall. Konsequenterweise führt das Layout einer gruppierten Lochdüse zu zusätzlichen Freiheitsgraden, die genutzt werden können, um den gesamten Prozess von der Zerstäubung bis hin zur Verdampfung zu optimieren.

Durch die Einspritzung unter hohem Druck in eine dieselmotorähnliche Atmosphäre kann bei den betrachteten Dieselsprays von sich überlappenden Gasjets ausgegangen werden (vgl. Kapitel 2, Abschnitt 2.51). Der Winkel zwischen den beiden Einzelsprays reicht in der Literatur über parallele bis hin zu konvergierenden Sprays. In dieser Arbeit werden fast parallele Sprays betrachtet, die einen Abstand von 0,654 mm aufweisen und sich unter einem Winkel von $1,5^\circ$ aufeinander zubewegen.

Stand der Forschung Sprays gruppiertter Lochdüsen wurden in der Literatur mittels verschiedener optischer Messtechniken untersucht. Hauptsächlich lag der Fokus dabei auf makroskopischen oder globalen Sprayeigenschaften. Positive Zerstäubungseffekte und kleinere Tröpfchen, die zu einer verbesserten Gemischbildung und Verbrennung sowie zu einer Reduzierung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch führen, konnten bereits nachgewiesen werden [113, 38, 70, 76]. Der Nahbereich, in dem die Einzelsprays der gruppierten Lochdüse noch unterschieden werden können, wurde noch nicht im Detail untersucht. Die in der Literatur betrachteten Düsen sind zum Teil mit parallelen oder divergenten Lochpaaren ausgestattet. Die Unterschiede in der Sprayform fallen bei diesen Varianten im Vergleich zu Referenzdüsen auf, besonders das nicht rotationssymmetrische Spray der gruppierten Lochdüse [113]. Parallel angeordnete Spritzlöcher zeigen laut Zhang *et al.* [113] in der Penetration, der Sprayform und dem Kegelwinkel keinen Unterschied zu einem konventionellen Ein-Loch-Spray. Jedoch können durch die gruppierte Lochdüse die Kraftstoffzerstäubung, die Verdampfung und das Aientrainment teilweise verbessert werden. Düsen mit einem Winkel von $5 - 10^\circ$ zwischen den konvergierenden Sprays haben bei Aufprall auf eine Wand eine andere Sprayform und breiten sich daher auf dieser schneller aus.

Wird Kraftstoff unter hohem Druck in eine ruhende Atmosphäre eingespritzt, führt dies zu einer hohen Relativgeschwindigkeit zwischen dem Spray und dem umgebenden Gas. Dies unterstützt einen schnellen Aufbruch des Kraftstoffs und zu einem Transfer des Impulses der Tröpfchen an das umgebende Gas. Die Tröpfchen werden dadurch abgebremst. Gleichzeitig wird das umgebende Gas an der Sprayspitze durch das Spray verdrängt, während das eingezogene Gas innerhalb der Tröpfchenwolke mit dieser beschleunigt wird. Der Impulstransfer ist bei leichten Tröpfchen

schneller (Widerstand $\propto D^2$, Trägheit $\propto D^3$). Diese beiden Effekte führen zu einem Druckverlust innerhalb des Sprays, den die Gasströmung in das Spray hinein verursacht. Die zugrunde liegenden Druckgradienten sind im Nahbereich der Düse am stärksten, da dort die Spraygeschwindigkeiten am höchsten sind. Die exakte Ausprägung der sprayinduzierten Gasströmung und die Geschwindigkeit der Strömung sind von der örtlichen Geschwindigkeitsverteilung, der Dichte und der Tröpfchengröße abhängig [96].

Untersuchungen des Airentrainments von gruppierten Dieselsprays mit um 10° zueinander divergenten Sprays zeigen ein erhöhtes Entrainment im Vergleich zu Einzelsprays mit gleichem Massendurchsatz [70]. Die Untersuchungen von Moon *et al.* fanden jedoch bei Umgebungsbedingungen statt. Pawlowski [78] hat das Entrainment von gruppierten Düsen mit um 10° und um 20° divergierenden Spritzlöchern untersucht und erhielt bei einer Temperatur von $T = 800$ K und einem Umgebungsdruck von $p_g = 50$ bar ein etwas stärkeres Entrainment als am Einzelspray. Eine grundlegende Arbeit zu diesem Bereich stammt von Fujimoto *et al.* [36]. Diese beschäftigt sich mit der Interaktion zwischen Dieselsprays einer Dreilochdüse, deren Spritzlöcher in einer Ebene liegen. Es wird gezeigt, dass sich die Sprayachsen aufgrund eines Anziehungseffekts wie dem *Coandă*-Effekt¹ anziehen und dass zwischen den Einzelsprays eine Luftströmung in Richtung der Düse auftritt, die bei konventionellen Sprays nicht zu beobachten ist.

Aleiferis *et al.* [3] zeigen, dass die Flüssigkeitsreichweite einer konventionellen Referenzdüse mit einer Lochreihe und sieben Spritzlöchern im Vergleich zu einer gruppierten Düse mit zwei parallelen Lochreihen (14 Spritzlöcher) mit gleichem hydraulischen Durchfluss einen sehr ähnlichen Verlauf zeigt. Die Penetration der Dampfphase der beiden Sprayarten und die Krümmung und somit die Form des Sprays unterscheiden sich nur leicht.

Im Nahbereich der Düse ist das Dieselspray optisch noch sehr dicht, dies lässt hochentwickelte optische Messtechniken, wie die PD-Messtechnik, zur Tröpfchengrößenbestimmung an ihre Grenzen stoßen. In der Literatur werden Dieselsprays deswegen hauptsächlich mit leichter zugänglichen Größen wie Penetration und Kegelwinkel charakterisiert [96, 89, 71, 36]. Die Abhängigkeit dieser charakteristischen Größen von der Düseninnenströmung ist bekannt, eine Korrelationen zwischen Sprayeigenschaften und der Effizienz der Verbrennung konnte ebenfalls gezeigt werden [111]. Die Penetration $L_S(t)$ der Sprayspitze (vgl. Abschnitt 2.4.1) steigt als Funktion der Zeit zunächst linear $\propto t$ an. Ab einem gewissen Punkt, dem Aufbruchzeitpunkt, verlangsamt sich die Penetration der Sprayspitze und ist proportional zu \sqrt{t} [71], während der Kegelwinkel eines Sprays im Zeitraum der stationären Phase der Einspritzung näherungsweise konstant bleibt.

Die Verdampfung des Dieselsprays sollte vollständig abgeschlossen sein, bevor es zum (durchaus für Dampf erwünschten) Wandkontakt kommt. Daher ist bei dieselmotorähnlichen Bedingungen die Flüssigkeitsreichweite des Dieselsprays eine wichtige Sprayeigenschaft, da sie als Indikator für das Verhältnis zwischen Verdampfung und Einspritzrate dient. Je geringer die Flüssigkeitsreichweite, desto stärker die Verdampfung. Für konventionelle Sprays ist die Flüssigkeitsreichweite unabhängig vom Einspritzdruck. Jedoch ist diese stark von Düsengeometrie, Kraftstofftemperatur, Umgebungstemperatur und -dichte abhängig [96] (siehe Abschnitt 2.4.1). Fluktuationen der Flüssigkeitsreichweite um einen stationären Wert sind typisch und wurden für konventionelle Düsen von Johnson *et al.* untersucht [50]. Untersuchungen mit einem stärkerem Fokus auf den Nahbereich von konventionellen Sprays wurden ebenfalls durchgeführt [63, 23, 100]. Inhalte dieser Untersuchungen sind das Öffnungs- und Schließverhalten bei Dieseleinspritzungen sowie das Ablösen von Ligamenten und Tröpfchen vom optisch dichten Kernbereich des Sprays.

¹Der *Coandă*-Effekt beschreibt die Tatsache, dass Flüssigkeiten oder Gasströmungen sich entlang einer Oberfläche ausbreiten, anstatt sich von dieser abzulösen und der ursprünglichen Bewegungsrichtung zu folgen

Der Strahlkraftverlauf und die Impulsverteilung eines Sprays sind weitere wichtige Parameter zur Charakterisierung und Vorhersage der Gemischbildung von Sprays [51, 83, 79]. Die Strahlkraftmesstechnik kann im Gegensatz zu den optischen Messverfahren die Impulsverteilung innerhalb eines Einzelstrahls in verschiedenen Ebenen des Sprays darstellen. Für das optisch sehr dichte Dieselspray können so zusätzliche Erkenntnisse aus dem Inneren des Sprays gewonnen werden. In der Literatur sind bisher nur wenige Untersuchungen zu Strahlkraftmessungen von Dieselsprays zu finden. Zur Strukturverteilung innerhalb eines Sprays existieren kaum Veröffentlichungen.

Der Trend für Dieselsprays liegt bei hoher Penetration bei einem schmalen Kegelwinkel des Sprays bei festem Durchfluss. Dies bewirkt eine Erhöhung des vorgemischten zu diffusivem Anteil im Brennraum. Weniger Ruß, aber mehr Stickoxide sind die Folge. Durch eine höhere Abgasrückführung ist das Gesamtergebnis mit der beschriebenen Auslegung besser.

4.2 Durchfluss der Düsen

Um die vier verschiedenen Sprays in weiteren Untersuchungen vergleichen zu können, ist sowohl die Einspritzrate als auch die eingespritzte Masse von Interesse. So kann überprüft werden, ob die theoretisch angenommenen Zusammenhänge durch die um den Faktor $\sqrt{2}$ größeren effektiven Durchmesser der Spritzlöcher der gruppierten Lochdüse und der Referenzdüse SH171 auch nachgewiesen werden können. Die Referenzdüsen SH121 *Sitz* und *Sack* sollen demnach einen halb so großen Massenfluss aufweisen wie die gruppierte Lochdüse GH121 und die Referenzdüse SH171. Die beiden letztgenannten verfügen theoretisch über den gleichen hydraulischen Durchfluss, da sie den gleichen effektiven Durchmesser besitzen. Die Injektoren werden per Einspritzanalyse mittels hydraulischem Druckanstieg (HDA- [35]) untersucht. Dabei wird in eine Kammer eingespritzt, die mit Prüflöl gefüllt ist und an der ein Druck von $p_g = 50$ bar anliegt. Dieser ist höher als bei den beschriebenen Experimenten in der Druckkammer. Um Kavitation in der Kammer mit dem Fluid zu unterdrücken, ist eine Erhöhung notwendig. Diese ist im Vergleich zum Einspritzdruck aber quasi vernachlässigbar.

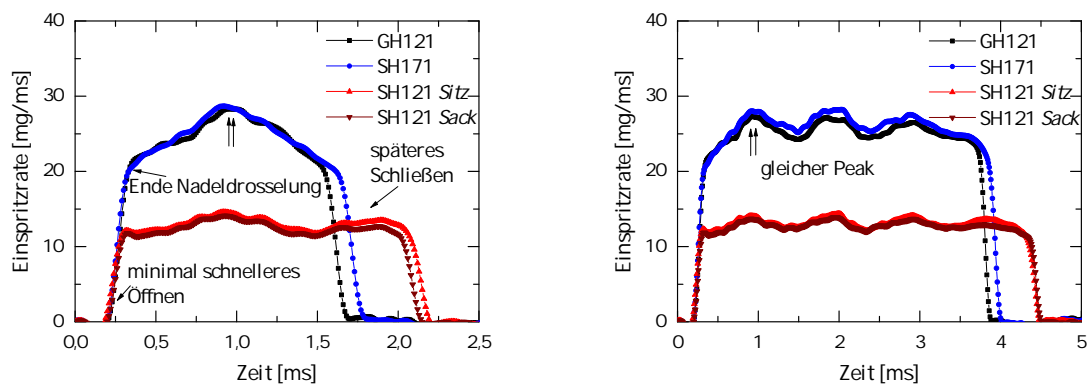


Abbildung 4.1: Darstellung der Einspritzrate über zwei unterschiedlich lange Zeitfenster ($t_1 = 641 \mu\text{s}$, $t_2 = 1500 \mu\text{s}$) für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar für die vier betrachteten Düsen

Abbildung 4.1 zeigt den Einspritzratenverlauf für zwei unterschiedlich lange Ansteuerzeiten t_A . In der linken Abbildung ist die Einspritzrate für eine Ansteuerzeit von $t_A = 641 \mu\text{s}$ dargestellt, die im Rahmen dieser Arbeit für Untersuchungen bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar

Düse	gem. Einspritzrate [mg/ms]	Stdabw. [mg/ms]	Durchflussbeiwert c_D [-]
GH121	25,67	0,94	0,90
SH171	26,60	0,96	0,94
SH121 <i>Sitz</i>	13,22	0,60	0,93
SH121 <i>Sack</i>	12,98	0,49	0,91

Tabelle 4.1: Gemittelte Einspritzrate mit Standardabweichung und berechnetem Durchflussbeiwert c_D über einen quasi-stationären Zeitbereich von 0,8 – 3,5 ms für die vier Düsen bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar und einer Ansteuerzeit von $t_A = 1,5$ ms

verwendet wird. Um Unsicherheiten durch transiente Effekte wie Nadelöffnen und -schließen zu minimieren, wird zusätzlich ein längerer Ansteuerzeitraum von $t_A = 1500 \mu s$ betrachtet. Der Verlauf für die kürzere Ansteuerzeit zeichnet sich für die Düsen mit größerem hydraulischem Durchfluss (GH121 und SH171) durch einen Anstieg bis zu einem Maximum nach 1 ms aus, danach nimmt die Einspritzrate auf gleiche Weise wieder ab. In dem dargestellten Verlauf für die länger andauernde Einspritzung (rechts dargestellt) fällt eine Wellenbewegung der Einspritzrate mit Maxima bei ca 1, 2 und 3 ms auf. Die Wellenbewegung ist für die Düsen mit höherem Durchfluss stärker ausgeprägt. Auffällig ist sowohl bei kurzer als auch bei langer Ansteuerungszeit, dass sich das Schließverhalten der beiden Injektoren mit theoretisch gleichem hydraulischem Durchfluss unterscheidet. Der Injektor der gruppierten Lochdüse GH121 schließt für beide dargestellten Verläufe um ca. 0,1 ms früher. Im restlichen Verlauf entsprechen sich die Einspritzraten der Düsen mit theoretisch gleichem hydraulischen Durchfluss.

Bei Betrachtung der gemittelten Einspritzrate, die über den quasi-stationären Bereich von 0,8 – 3,5 ms gemittelt wurde, zeigt sich, dass sich die Einspritzrate der Düsen mit höherem Durchfluss GH121 und SH171 um 3,6 % unterscheiden. Die Einspritzrate der Referenzdüse ist nicht nur in der Gesamtbetrachtung durch späteres Schließen, sondern auch innerhalb des quasi-stationären Bereichs etwas höher. Die Standardabweichung liegt für beide Düsen im vergleichbaren Bereich. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle 4.1 eingetragen. Der leicht geringere Durchfluss der gruppierten Lochdüse kann durch die Konkurrenz zwischen den beiden Spritzlöchern in der Kraftstoffzuströmung entstehen. Bei den Düsen mit geringerem Durchfluss (SH121 *Sitz* und *Sack*) unterscheidet sich die Einspritzrate im quasi-stationären Bereich von Sitz- und Sacklochvariante um 1,8 %, der Einspritzratenverlauf ist sehr ähnlich. Im gemittelten, quasi stationären Bereich der Einspritzung ist die gemittelte Einspritzrate für die Düsen mit höherem hydraulischen Durchfluss (GH121 und SH171) in etwa um den erwarteten Faktor 2 größer. Für die weiteren Untersuchungen kann von der doppelten Einspritzmenge im gleichen Zeitraum ausgegangen werden.

Der Durchflussbeiwert c_D (vgl. Abschnitt 2.1) stellt den erzielbaren Durchsatz einer Flüssigkeit durch ein Ventil dar, dieser Wert ist als effektiver Querschnitt und somit als Wirkungsgrad der Düse interpretierbar. Für die gruppierte Lochdüse beträgt der Wert $c_D = 0,90$ und liegt somit im Bereich der typischen Werte für einen Dieselinjektor mit konischen und stark verrundeten Spritzlöchern. Die Werte für die konventionellen Referenzdüsen liegen nur geringfügig höher (siehe Tabelle 4.1). Somit kann sowohl bei der gruppierten Lochdüse als auch bei den Referenzdüsen von einem hohen Wirkungsgrad der Strömung durch das Düsenloch ausgegangen werden. Die Messungen, die für die Einspritzdrücke 400 und 2000 bar durchgeführt wurden, sind nicht dargestellt, da das Ergebnis absolut vergleichbar ist.

4.3 Geometrische Charakterisierung

Durch Untersuchungen bei Raumtemperatur und einer Gasdichte, die in der gleichen Größenordnung wie in einem Motor liegt, können die Zerstäubung und die grundlegenden physikalischen Mechanismen der gruppierten Lochdüse im Detail untersucht werden. Die Untersuchungen an der Kammer bei Raumtemperatur bieten den Vorteil der optisch perfekten Zugänglichkeit und somit eine vereinfachte Auswertung der Messungen.

Sprayform und charakteristische Eigenschaften des Sprays wie Penetration, Spraybreite, Kegelwinkel und Hauptbewegungsrichtung des Sprays können aus Schattenaufnahmen ausgewertet werden: In einem ersten Schritt wird der Hintergrund normalisiert und von der Aufnahme abgezogen. Das Bild wird so gedreht, dass das Spray vertikal nach oben zeigt. Ein passender Schwellwert für die Bildhelligkeit wird vorher manuell für alle Aufnahmen bestimmt, um anschließend die gesamte Sequenz zu binarisieren. Die Spraybreite wird in verschiedenen Abständen vom Injektorausstritt des Sprays ermittelt, der Kegelwinkel wird mittels linearer Regression der Werte der Spraybreite für die ersten 25 Millimeter der Spraylänge berechnet. Der Kegelwinkel im Nahbereich wird ebenfalls mittels linearer Regression gebildet, allerdings nur mit den Werten der Spraybreite der ersten beiden Millimeter (um die Einzelkegelwinkel für die gruppierte Lochdüse zu bilden, wird der Kegelwinkel nur auf einer Länge von 0,8 mm gebildet). Die ermittelte Penetration eines Sprays ist als Abstand der Sprayspitze von der Düse definiert, innerhalb dessen 98 % des binarisierten Sprays lokalisiert werden können. Die zu ermittelten Größen werden aus einer Mittelung von 50 Aufnahmen pro Betriebspunkt gewonnen.

Der Penetrationsverlauf für die verschiedenen Sprays ist in Abbildung 4.2 links gezeigt. Die einzelnen Messungen sind als Punkte mit Fit abgebildet, der den Verlauf der Penetration verdeutlicht. Die Penetration steigt, wie erwartet, über der Zeit an [71], zunächst linear und dann proportional zu $\propto \sqrt{t}$. Die Penetration der gruppierten Lochdüse gleicht der der Referenzdüse mit gleichem Durchfluss (SH171) am ehesten. Anhand der als Punkte einzeln dargestellten Messungen ist ersichtlich, dass die Schuss-zu-Schuss-Schwankungen für die Referenzdüse SH171 am höchsten sind. Für die Düse SH121 *Sitz* beginnt die Einspritzung früher als für die anderen drei Varianten. Außerdem ist die Penetration der Sprayspitze zu Beginn der Einspritzung ($t < 0,4\text{ ms}$) bei dieser Düse höher als für die beiden Düsen mit höherem Durchfluss (GH121 und SH171). Zum Zeitpunkt $t = 0,45\text{ ms}$ schneiden sich die Penetrationskurven der Düsen mit geringem Durchfluss (SH121 *Sitz* und *Sack*) mit den Kurven der Düsen mit hohem Durchfluss (GH121 und SH171). Der frühe, transiente Beginn der Einspritzung ist stark von der Strömung um die Nadel und in das Sackloch abhängig. Das Nadelöffnen ist durch den Anstieg des Drucks unter der Nadel bestimmt und kann somit als unterschiedlich für die betrachteten Düsen erwartet werden. Durch den geringeren Durchfluss ist der Druckverlust im Sitz geringer, wodurch die Nadel schneller öffnet. In den Düsen mit geringerem Durchfluss baut sich der Druck schneller auf, die Penetration ist zu Beginn der Einspritzung stärker. Die HDA-Ergebnisse legen nahe, dass Nadeldrosseln für $t > 0,30\text{ ms}$ bzw. $0,35\text{ ms}$ keine Rolle mehr spielt.

Bei Betrachtung des Kegelwinkel des Gesamtsprays (Abbildung 4.2 rechts) zeigt sich, dass das gruppierte Spray einen schmaleren Gesamtkegelwinkel aufweist als die Referenzdüse SH171 mit gleichem Durchfluss. Der Grund dafür ist nicht bekannt, allerdings ist eine stabilisierende Wirkung des Sitzlochsprays vorstellbar und der geringe konvergierende Winkel zwischen den beiden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse dient der Reduzierung der Sprayausbreitung normal zur Bewegungsrichtung des Sprays. Das Referenzspray SH171 weist einen größeren Kegelwinkel auf und zeigt höhere Schuss-zu-Schuss Schwankungen. Die Referenzdüsen SH121 verhalten sich

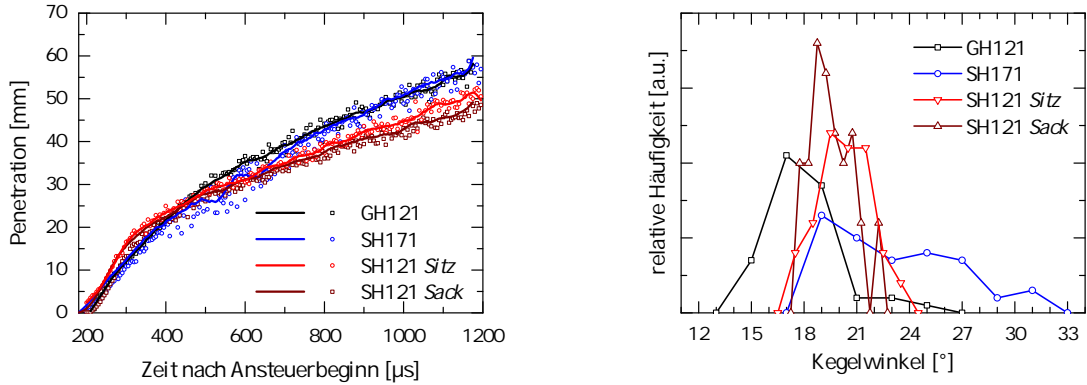


Abbildung 4.2: Penetration der Sprayspitze (links) und Häufigkeitsverteilung des Kegelwinkels zum Zeitpunkt $t = 0,7$ ms (rechts) für die verschiedenen Sprays. Für die Penetration sind die einzelnen Messpunkte dargestellt, ergänzt mit einem Fit, der den Verlauf der Penetration verdeutlicht. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur ($T_g = 298$ K), einem Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar und einer Gasdichte von $\rho_g = 23$ kg/m³ durchgeführt, Daten ermittelt aus 200 beziehungsweise 50 Einspritzungen.

beide sehr stabil, sie zeigen die wenigsten Ausreißer und weisen einen mittleren Kegelwinkel auf. Im Vergleich zu den in diesen Untersuchungen genutzten Drei-Loch-Düsen haben konventionelle Mehrlochdüsen (6-8 Löcher) leicht schmalere Kegelwinkel, da die höhere Anzahl an Spritzlöchern die Innenströmung in das Sackloch stabilisiert, weil weniger Querströmungsanteile pro Spritzloch vorhanden sind [61].

Zusätzlich zur Untersuchung des gesamten Sprays wird auch der Nahbereich der Sprays betrachtet, da hier der Unterschied vom gruppierten Spray zu den Referenzsprays am deutlichsten ist. In Abbildung 4.3 sind Aufnahmen vom Nahbereich der Sprays dargestellt, aus denen die Breite der Sprays und der Kegelwinkel der Sprays in sehr geringen Abständen zur Düse bestimmt werden können (Abbildung 4.4). Eine Separation der gruppierten Sprays ist mit Hilfe der optischen Aufnahmen bis zu einem Abstand von ca. 1,3 mm für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar vom Düsenaustritt möglich. Eine leichte Zunahme der Strecke, innerhalb der die beiden Einzelsprays separierbar sind, ist mit ansteigendem Einspritzdruck zu verzeichnen: 1 mm bei $p_E = 400$ bar, 2 mm bei $p_E = 2000$ bar. In den Hochgeschwindigkeitssequenzen des Nahbereichs sind Wolken kleiner Spraytröpfchen am Rand des Sprays, wie auch in Abbildung 4.3, und starke Fluktuationen in der Form des Sprays, erkennbar. Generell sind Sacklochsprays (mittlere Bilder, Abbildung 4.3) breiter und haben eine unregelmäßigere Form. In der unmittelbaren Umgebung der Sprays sind Druckwellen erkennbar, die sich mit dem Spray bewegen und die von den Düsenlöchern zu kommen scheinen. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits von Pickett *et al.* [80] gezeigt.

Die *Micro* Spraybreite, die in Abbildung 4.4 links dargestellt ist, ist in einem Abstand von 3 mm vom Düsenaustritt definiert. In diesem Abstand können die beiden Sprays der gruppierten Lochdüse nicht mehr separiert betrachtet werden. Die Spraybreite wird über die Ränder der Sprays mittels Gradienten der Bildhelligkeit entlang Profilen normal zur Sprayachse ermittelt. Das gruppierte Spray weist mit 1,5 mm die höchste Breite in einem Abstand von $x = 3$ mm von der Düsen Spitze auf, der Unterschied zur Breite des Referenzsprays SH171 ist jedoch geringer als die Separierung zwischen den beiden gruppierten Löchern vermuten lässt. Das Spray der kleinen Sacklochdüse ist im Mittel fast genauso breit wie das Spray der größeren Sacklochdüse.

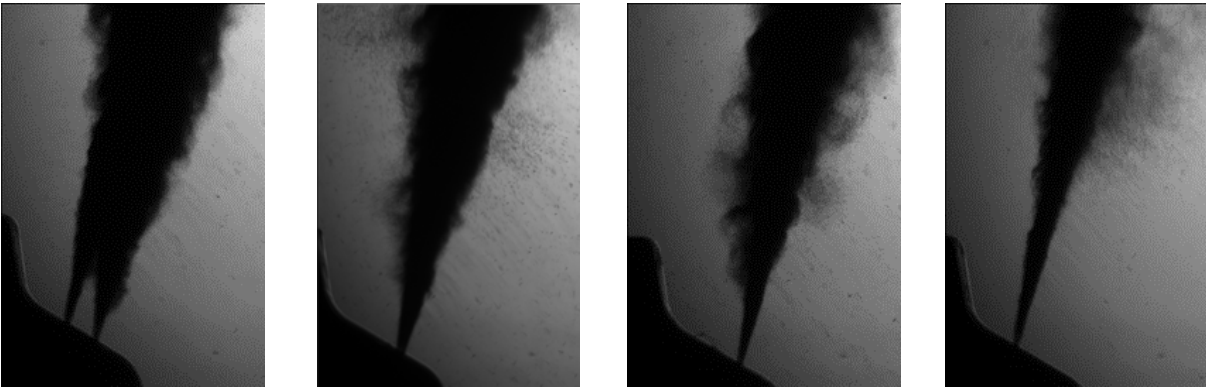


Abbildung 4.3: Schattenaufnahmen des Nahbereichs der Dieselsprays $t_{\text{ASOE}} = 0,7 \text{ ms}$ nach Trigger. Von links nach rechts die gruppierte Düse GH121, die konventionellen Referenzdüsen SH171, SH121 *Sack* und SH121 *Sitz*. Raumtemperatur, Einspritzdruck $p_E = 1050 \text{ bar}$, $\rho_g = 23 \text{ kg/m}^3$, Ausschnitt $7,5 \text{ mm} \times 4,8 \text{ mm}$.

Im Gegensatz dazu zeigt das Spray der Sitzlochdüse SH121 *Sitz* deutlich weniger Schuss- zu-Schuss-Schwankungen, also eine geringere Standardabweichung, und ist deutlich schmäler.

Sehr ähnliche Trends zeigen sich auch für den *Micro* Kegelwinkel, der in einem geringeren Abstand von $z = 1,5 \text{ mm}$ ausgewertet wird. Die einzelnen Sprays der gruppierten Lochdüse sind noch separierbar: Das Sitzlochspray der gruppierten Lochdüse ist schmäler und stabiler als das Sacklochspray der gruppierten Lochdüse. Hier zeigen sich die gleichen Trends, wie schon bei den Referenzdüsen beobachtet. Im Vergleich zum Referenzspray SH121 *Sitz* ist das Sitzlochspray der gruppierten Lochdüse breiter und weist stärkere Schuss-zu-Schuss-Schwankungen auf. Das Sacklochspray der gruppierten Lochdüse ist ebenfalls breiter als das der Referenzdüse. Ein schwacher Trend eines sinkenden *Micro* Kegelwinkels mit ansteigendem Einspritzdruck konnte für alle Sprays beobachtet werden. Für einen Einspritzdruck von $p_E = 400 \text{ bar}$ liegt der Micro-Kegelwinkel um ca. 3° höher. Für 2000 bar Einspritzdruck sind die Sprays im Nahbereich deutlich schmäler und verengen sich im Vergleich zum mittleren Einspritzdruck um ca. 8° . Dieser Trend ist jedoch nur im Nahbereich vorhanden, das Gesamtspray wird mit höherem Einspritzdruck breiter. Untersuchungen bei Umgebungstemperatur sind durch die höhere Auflösung und die einfachere Bildverarbeitung, durch die Abwesenheit von Schliereneffekten, die durch Temperaturgradienten verursacht werden können, präziser. Dies ermöglicht die Ermittlung des Kegelwinkels der Einzelsprays der gruppierten Lochdüse. Sowohl für die gruppierte Lochdüse als auch für die Referenzdüsen ist das Sitzlochspray stabiler und schmäler als das Sacklochspray.

4.4 Verdampfungsverhalten

Das Zerstäubungs- und Verdampfungsverhalten von Sprays bei motorähnlichen Bedingungen unterscheidet sich von dem bei Umgebungstemperatur maßgeblich, durch Temperatur und Dichteinflüsse verdampfen Bereiche des Sprays direkt zu Beginn der Einspritzung. Bei Raumtemperatur verdampft Diesel so gut wie gar nicht. Das Verhalten des Sprays bei motorähnlichen Bedingungen ist für die Beurteilung des Sprays für die spätere Verwendbarkeit und Auslegung im Motor entscheidend. Allerdings kann bei diesen Betriebspunkten das Spray nicht so detailgenau untersucht werden, wie dies bei Umgebungstemperatur möglich ist. Die Auswertung wird hier durch Schliereneffekte durch die hohen Dichtegradienten im Versuchsträger erschwert. Einen

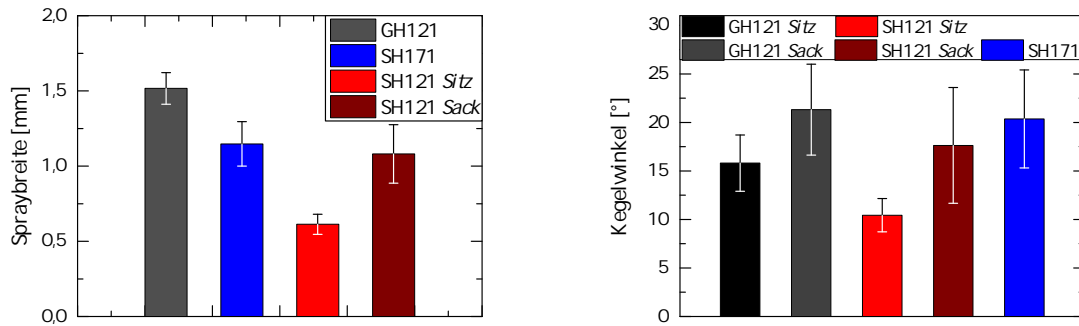


Abbildung 4.4: Spraybreite in einem Abstand von 3 mm von der Düse und *Micro* Kegelwinkel, aufgenommen bis zu einem Abstand von $x = 1,5$ mm, für das gruppierte Spray sind die Kegelwinkel der beiden Einzelsprays ermittelt. Umgebungstemperatur, Einspritzdruck $p_E = 1050$ bar, $\rho_g = 23 \text{ kg/m}^3$, $t_{ASOI} = 0,7$ ms.

weiteren Grund für die erschwerte Auswertung stellen die zwangsläufig entweder massiveren oder instationären Brennräume dar.

4.4.1 Flüssigkeitsreichweite

Die Flüssigkeitsreichweite ist als Abstand von der Spitze des flüssigen Anteils des Sprays zur Düse definiert (siehe Abschnitt 2.4.1). Unter motorähnlichen Bedingungen ist dies eine wichtige Größe zur Charakterisierung der Gemischbildung: Eine kürzere Flüssigkeitsreichweite deutet auf eine schnellere Verdampfung und Gemischbildung hin. Die Flüssigkeitsreichweite bezeichnet somit auch den Abstand, den das Spray benötigt, um ausreichend heißes Gas mitzureißen, um den eingespritzten Kraftstoff vollständig zu verdampfen [96]. Durch die Flüssigkeitsreichweite wird die Phasengrenze zwischen flüssigem und dampfförmigem Kraftstoff detektiert. Der dampfförmige Kraftstoff penetriert weiter.

Für konventionelle Sprays ist ein stationärer Wert der Flüssigkeitsreichweite, der sich bereits kurz nach Beginn der Einspritzung eingestellt hat, ein bekanntes Resultat. Dieser ist proportional zum Spritzlochdurchmesser und bei erhöhtem Einspritzdruck und somit erhöhter Einspritzmenge auf dem gleichen Niveau wie für einen geringeren Einspritzdruck [96]. Der Wert der Flüssigkeitsreichweite für das gruppierte Spray kann somit anzeigen, ob eine komplette Interaktion der beiden Sprays stattfindet. Die zeitlich konstante Flüssigkeitsreichweite kommt dadurch zustande, dass sich die Einspritzrate ($\propto \sqrt{p_E} d^2$) und die eingebrachte Verdampfungs menge (Entrainment, $\propto \sqrt{p_E} d$) im Gleichgewicht befinden. Zusätzlich ist die Flüssigkeitsreichweite ein experimentell leicht zugänglicher Indikator für das Entrainment oder die Tröpfchengröße.

Wie Abbildung 4.5 zeigt, kann die Flüssigkeitsreichweite eines Sprays sowohl mittels Streulicht als auch mittels Schattenaufnahmen ermittelt werden. Durch die Schlierenaufnahmen, rechts dargestellt, kann die Penetration der Dampfphase bestimmt werden. Abbildung 4.6 links zeigt die ermittelte Flüssigkeitsreichweite sowohl aus Hochgeschwindigkeitssequenzen aus Streulicht als auch aus Schattenaufnahmen. Der ermittelte Verlauf der Flüssigkeitsreichweite aus den beiden unterschiedlichen Aufnahmearten stimmt sehr gut überein. Bei den Schattenaufnahmen erstrecken

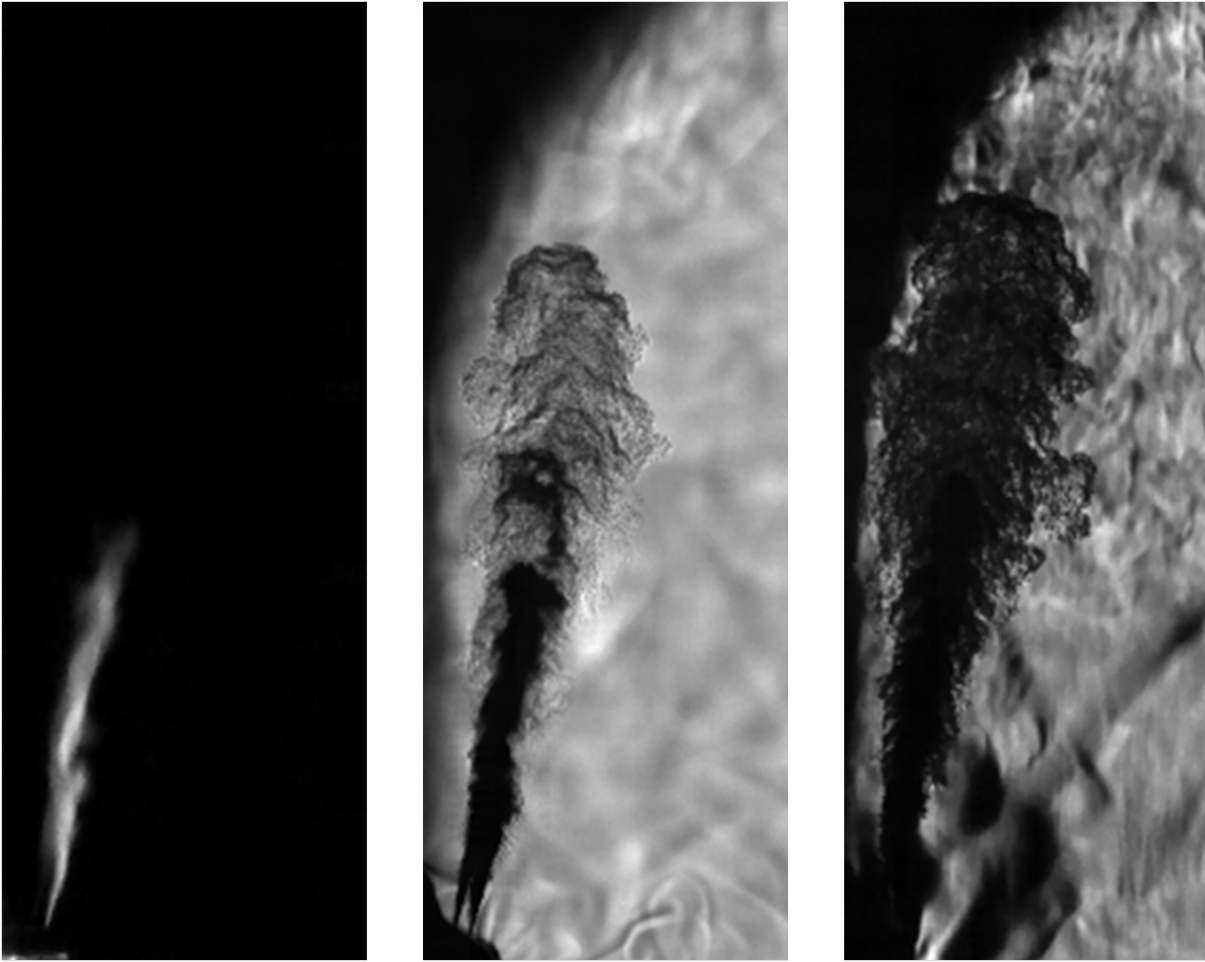


Abbildung 4.5: Streulicht-, Schatten und Schlierenaufnahme eines Dieselsprays zum Zeitpunkt $t_{\text{ASOE}} = 0,5 \text{ ms}$. Randbedingungen für die Aufnahmen: $T_g = 1000 \text{ K}$, Einspritzdruck $p_E = 1050 \text{ bar}$. Größe der Aufnahme $31 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$. Bei der links abgebildeten Streulichtaufnahme wurde das Spray von der rechten Seite beleuchtet, weswegen im Nahbereich nur eine der beiden Strahlwurzeln erkennbar ist. Die mittlere und rechte Aufnahme sind durch Hintergrundbeleuchtung ausgeleuchtet.

sich die detektierten Fluktuationen über einen größeren Bereich, dies liegt wahrscheinlich an dem geringeren Gesamtkontrast der Streulichtaufnahmen und deren längerer Belichtungszeit von $t = 4 \mu\text{s}$, die eine höhere Bewegungsunschärfe verursacht und somit die Bilder glättet. Kleine Unterschiede in den ermittelten Flüssigkeitsreichweiteverläufen sind unumgänglich, da unterschiedliche Einspritzungen ausgewertet wurden. Die Schattenaufnahmen werden aufgrund eines höheren Informationsgehaltes für weitere Auswertungen verwendet, obwohl die Streulichtaufnahmen einfacher auszuwerten sind. An der ermittelten Flüssigkeitsreichweite ist auffällig, dass sich über den Zeitraum der Einspritzung nicht der erwartete stationäre Bereich einstellt, innerhalb von dem die Flüssigkeitsreichweite nur noch Fluktuationen um einen konstanten Wert zeigt. Stattdessen zeigt sich ein bogenförmiger leicht parabolischer Verlauf über die Dauer der Einspritzung, der eventuell auf die kurze Einspritzdauer zurückzuführen ist oder aber auch für die gruppierte Lochdüse charakteristisch sein mag.

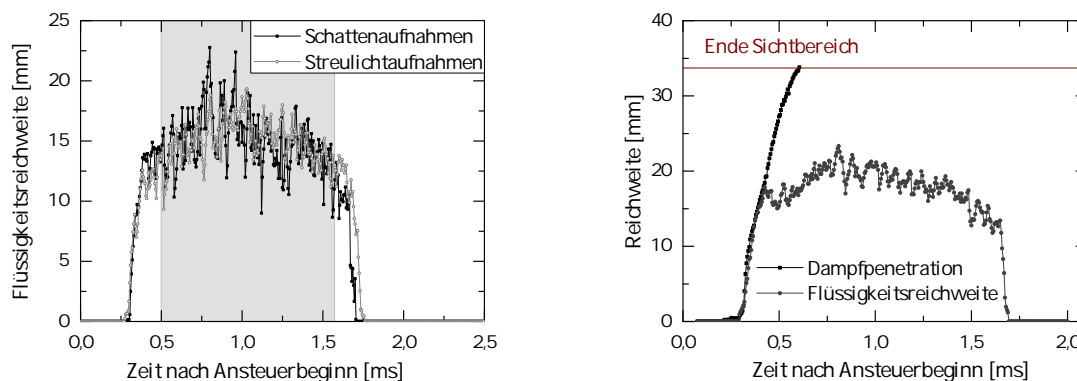


Abbildung 4.6: Flüssigkeitsreichweite der gruppierten Lochdüse für Schattenaufnahmen (schwarz) und Streulichtaufnahmen (grau) für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar und eine Umgebungstemperatur von $T_g = 1000$ K (links). Dampf- und Flüssigkeitsreichweite im zeitlichen Verlauf für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar bei einer Umgebungstemperatur von $T = 1000$ K, (rechts).

Zur Ermittlung der Flüssigkeitsreichweite werden die Aufnahmen mittels Hintergrundabzug und Drehung des Sprays in die horizontale Ebene vorbereitet. Anschließend erfolgt eine Binarisierung anhand eines festen Grenzwertes um die Spraykontur zu erhalten. Profile von zehn parallelen Linien mit geringem Abstand, die im Bereich des Sprays liegen, werden betrachtet und die größte ermittelte einfache Reichweite verwendet. Bei einer Lücke zwischen dem Hauptspray und der sich lösenden Tröpfchenwolke² sind hohe Schwankungen in der Position der Spitze erkennbar. Sobald der Abstand zwischen Spray und sich lösender Tröpfchenwolke größer als ein Millimeter ist, wird nur das Hauptspray zur Berechnung der Flüssigkeitsreichweite verwendet.

Die Reichweiten beider Phasen, sowohl die der Flüssigkeit als auch die der Dampfphase, sind exemplarisch in Abbildung 4.6 rechts dargestellt. Die Flüssigkeitsreichweite wird aus Schattenaufnahmen ausgewertet, die Reichweite der Dampfphase aus Schlierenaufnahmen (vergleiche mit Abbildung 4.5). Hierbei wird in beiden Fällen eine Binarisierung des Sprays vorgenommen, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, aus der dann die entsprechende Reichweite bestimmt wird. Zu Beginn der Einspritzung liegen die beiden Verläufe exakt übereinander, bis die Flüssigkeitsreichweite in einem Abstand von ca. 18 mm vom Düsenaustritt ein stationäres Niveau erreicht auf dem sie bis zum Ende der Einspritzung verbleibt. Die Penetration der Dampfphase gelangt bis zum Ende des Sichtbereichs in der Kammer und ist somit mindestens doppelt so groß wie die Flüssigkeitsreichweite. Der Anstieg der Dampfpenetration zu Beginn der Einspritzung ist linear. Die Dampfphase kann nach Ende der Einspritzung 0,3 ms länger in der Kammer detektiert werden als die Flüssigkeit, die zu diesem Zeitpunkt schon verdampft ist.

Bei einer Verdampfung des flüssigen Kraftstoffs wird eine signifikante Änderung in der Dichte erwartet. Diese Verringerung der Dichte würde in einer verstärkten Abbremsung der Dampfphase des Sprays resultieren. Wensing *et al.* [109] zeigen, dass keine starke Dichteänderung zugrunde liegen kann, da kein Knick im Verlauf der Dampfphasenreichweite sichtbar ist. Die Interpretation der gleichbleibenden Dichte ist, dass der Kraftstoff sich in einem überkritischen Zustand befindet, ohne dass eine Änderung der Dichte aufgrund von Verdampfung stattfinden kann.

²flüssige Ligamente, die sich vom Hauptspray lösen; engl. Slug

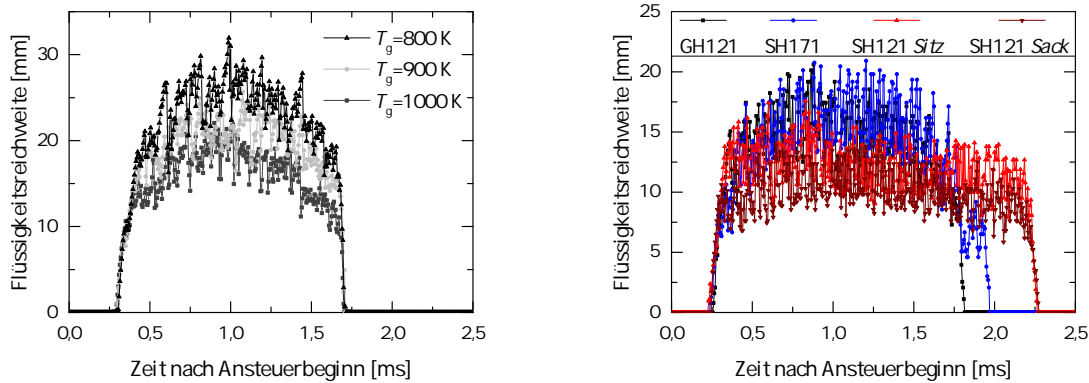


Abbildung 4.7: Darstellung des Verlaufs der Flüssigkeitsreichweite der gruppierten Lochdüse für verschiedene Umgebungstemperaturen bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050\text{ bar}$ und einer Dichte von $\rho_g = 12,8\text{ kg/m}^3$, (links) und Darstellung der Flüssigkeitsreichweite für die verschiedenen Sprays (rechts)

Abbildung 4.7 links zeigt den Verlauf der Flüssigkeitsreichweite für verschiedene Umgebungstemperaturen der gruppierten Lochdüse. Der Verlauf ist für alle Temperaturen ähnlich, es stellt sich kein eindeutig stationärer Bereich ein, wie das für eine konventionelle Düse erwartet wird. Die Flüssigkeitsreichweite nimmt mit ansteigender Temperatur ab, da in gleicher Zeit mehr Flüssigkeit verdampft werden kann. Für weiterführende Auswertungen wird zur Vergleichbarkeit trotzdem ein quasi-stationärer Bereich definiert, Tabelle 4.2 zeigt die zugehörigen Zeitbereiche für die unterschiedlichen Einspritzdrücke. Sie werden im Folgenden für die Berechnung der zeitlich gemittelten Flüssigkeitsreichweite verwendet.

Auf der rechten Seite der Abbildung 4.7 ist die Flüssigkeitsreichweite für die vier verschiedenen Sprays bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050\text{ bar}$ und gleicher Ansteuerzeit dargestellt. Die Flüssigkeitsreichweite fluktuiert sowohl für die Referenzsprays als auch für die gruppierte Lochdüse in ähnlichem Größenbereich. Für die Düsen mit geringerem effektivem Lochdurchmesser ist die Flüssigkeitsreichweite deutlich geringer, auch der bogenförmige Verlauf ist nicht mehr erkennbar. Im Vergleich der Sitz- und Sacklochreferenzdüse SH121 ist die Flüssigkeitsreichweite der Sitzlochdüse etwas höher, sonst gleichen sich die Verläufe. Für die Düsen mit großem Lochdurchmesser GH121 und SH171 zeigen die Flüssigkeitsreichweiten wieder einen bogenförmigen Verlauf. Für die gruppierte Lochdüse ist der Effekt allerdings etwas ausgeprägter. Die erreichte Flüssigkeitsreichweite ist für beide Sprays mit großem Lochdurchmesser ähnlich und liegt im Mittel bei 15 mm.

Die über den quasi-stationären Bereich und über drei Einspritzungen gemittelte Flüssigkeitsreichweite ist für die verschiedenen betrachteten Betriebspunkte (Tabelle 3.4) und Düsen in

Einspritzdruck	Zeitfenster zur Mittelung
$p_E = 400\text{ bar}$	0,7 - 1,4 ms
$p_E = 1050\text{ bar}$	0,5 - 1,6 ms
$p_E = 2000\text{ bar}$	0,5 - 2,0 ms

Tabelle 4.2: Stationäres Zeitfenster für die verschiedenen Einspritzdrücke, die zur Mittelung genutzt werden

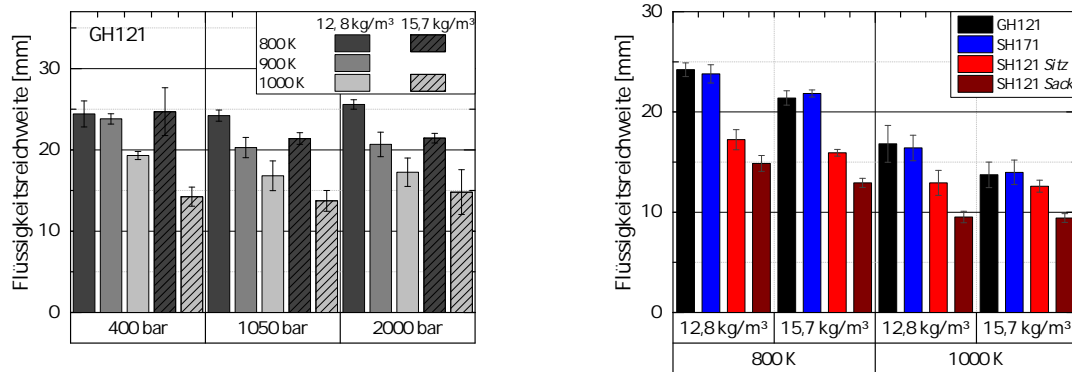


Abbildung 4.8: Darstellung eines Histogramms zur Flüssigkeitsreichweite der gruppierten Lochdüse für verschiedene Umgebungstemperaturen und Dichten bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar (links) und Darstellung eines Histogramms der Flüssigkeitsreichweite für die verschiedenen Sprays bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar für unterschiedliche Umgebungsbedingungen (rechts)

Abbildung 4.8 zeigt. Die Fehlerbalken stellen die gemittelte Standardabweichung innerhalb der betrachteten Zeitintervalle dar. In der linken Abbildung ist die Flüssigkeitsreichweite für die gruppierte Lochdüse für verschiedene Einspritzdrücke, Temperaturen und Umgebungsgasdichten abgebildet. Die Flüssigkeitsreichweite der gruppierten Lochdüse nimmt unabhängig vom Einspritzdruck mit steigender Temperatur und steigender Gasdichte ab. Außerdem bestätigt sich auch für die gruppierte Lochdüse die Unabhängigkeit der Flüssigkeitsreichweite vom Einspritzdruck. Die geringste Flüssigkeitsreichweite kann somit für die höchsten betrachteten Temperaturen und Gasdichten erzielt werden ($T_g = 1000$ K, $\rho_g = 15,7$ kg/m³). Bei Abnahme der Temperatur um $\Delta T = 100$ K nimmt die Flüssigkeitsreichweite um ungefähr 5 mm zu. Die gleiche Reduzierung der Flüssigkeitsreichweite kann durch eine Reduktion der Umgebungsdichte um $\Delta \rho_g = 3$ kg/m³ erreicht werden.

Die Flüssigkeitsreichweite der gruppierten Lochdüse stimmt in allen betrachteten Punkten gut mit der der Referenzdüse SH171 mit gleichem hydraulischem Durchfluss überein, wie in Abbildung 4.8 rechts zu sehen ist. Für die verschiedenen betrachteten Umgebungstemperaturen und Umgebungsdichten liegen die Flüssigkeitsreichweiten der beiden Sprays im gleichen Bereich. Für die Referenzdüsen mit geringerem hydraulischem Durchfluss SH121 ist die Flüssigkeitsreichweite geringer und unterscheidet sich leicht zwischen der betrachteten Sitz- und Sacklochdüse. Die für die Sitzlochreferenzdüse ermittelten Werte entsprechen den Erwartungen, sie sind vor allem bei geringeren Temperaturen von $T_g = 800$ K um den Faktor $\sqrt{2}$ kleiner. Bei höheren Temperaturen von $T_g = 1000$ K entspricht die Flüssigkeitsreichweite der Sacklochdüse der erwarteten. In allen betrachteten Punkten sind die ermittelten Werte der Flüssigkeitsreichweite für die Sacklochdüse SH121 Sack geringer als für die Sitzlochdüse. Der Trend der niedrigeren Flüssigkeitsreichweite für SH121 Sack ist auch im Verlauf in Abbildung 4.7 rechts zu sehen. Es fällt auf, dass die Sacklochdüse einen kleineren Durchfluss hat und düsennah der Micro Kegelwinkel der Sitzlochdüse kleiner ist. Das kompaktere Spray erfährt weniger Airentrainment. Die gruppierte Düse verhält sich wie ein Spray mit gleichem hydraulischen Durchfluss. Je höher Temperatur und umgebende Gasdichte liegen, desto weniger unterscheiden sich die ermittelten Flüssigkeitsreichweiten der Düsen mit großem Durchfluss (GH121, SH171) von den Düsen mit geringerem Durchfluss (SH121 Sitz,

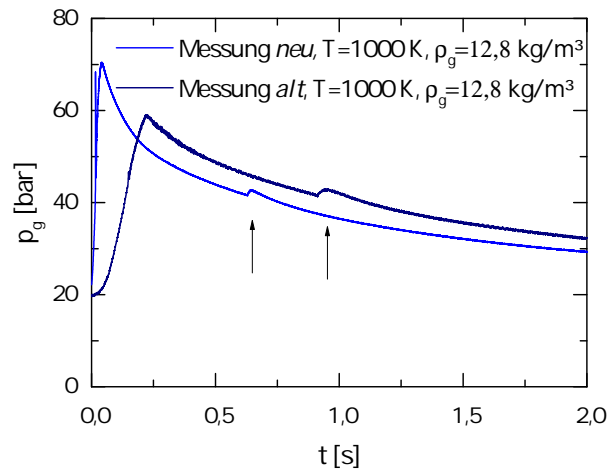


Abbildung 4.9: Druckverlauf in der Brennkammer für die Messungen, die in diesem Kapitel dargestellt werden (Messung *neu*) und die *alten* Messungen, dargestellt in [45]. Die Einspritzung erfolgt jeweils für die gleichen Randbedingungen bei 2% Sauerstoff und einem Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar. Der Einspritzzeitpunkt ist mit einem Pfeil markiert.

Sack). Die gezeigten Ergebnisse für die gruppierte Lochdüse und zugehörige Referenzdüsen passen zu Ergebnissen in der Literatur für konventionelle Mehrlochdüsen [76, 50, 96]. Außerdem zeigt sich eine Abnahme der Flüssigkeitsreichweite bei Anstieg der umgebenden Gasdichte. Der Effekt ist bei geringeren Temperaturen von $T_g = 800$ K stärker ausgeprägt. Die bereits aus der Literatur bekannte Unabhängigkeit vom Einspritzdruck zeigt sich hier für alle untersuchten Sprays [50].

Im Gegensatz zu von uns früher durchgeführten, bereits vorgestellten Untersuchungen der gruppierten Lochdüse [45] zeigt sich bei den hier gezeigten Untersuchungen für die Referenzdüsen und auch für die gruppierte Lochdüse keine Abhängigkeit vom Einspritzdruck. Der in unserer Veröffentlichung gezeigte Effekt der niedrigeren Flüssigkeitsreichweite bei niedrigerem Einspritzdruck kann an sich unterscheidenden Bedingungen in der Kammer während der beiden Messkampagnen liegen. Die Messungen der gruppierten Lochdüse wurden wiederholt, als die Messungen der Referenzdüsen stattfinden konnten. Da durch eine Wasserstoff-Sauerstoff-Vorverbrennung die heiße Umgebung in der Kammer erzeugt wird, kann nicht immer von exakt gleichen Bedingungen ausgegangen werden. Der Sauerstoffanteil nach der Vorverbrennung in der Kammer lag bei den Versuchen jeweils bei 2 %, allerdings unterscheidet sich der abfallende Druckverlauf bei den Versuchsreihen (siehe Abbildung 4.9). Für die neueren Messungen ist der Druckverlauf steiler, es wurde mit der Vorverbrennung ein höherer Ausgangsdruck und eine höhere Temperatur erreicht. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei den Versuchen, die eine Einspritzdruckabhängigkeit der Flüssigkeitsreichweite zeigen, die Temperatur in der Kammer zum Zeitpunkt der Einspritzung einen geringeren Wert erreichte als bei der zweiten Messreihe (Messung *alt*), bei der die Flüssigkeitsreichweite eine Unabhängigkeit vom Einspritzdruck zeigt. Die Werte für die Flüssigkeitsreichweite liegen für beide Messungen im gleichen Bereich wie bei den vorherigen Messungen für den mittleren Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar. Da pro Betriebspunkt nur drei Einspritzungen gemittelt werden können, stellt dies einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor dar. Die wichtigsten Trends, die im Paper [45] dargestellt sind, sind in Ordnung und stimmen mit den später durchgeführten Messungen überein.

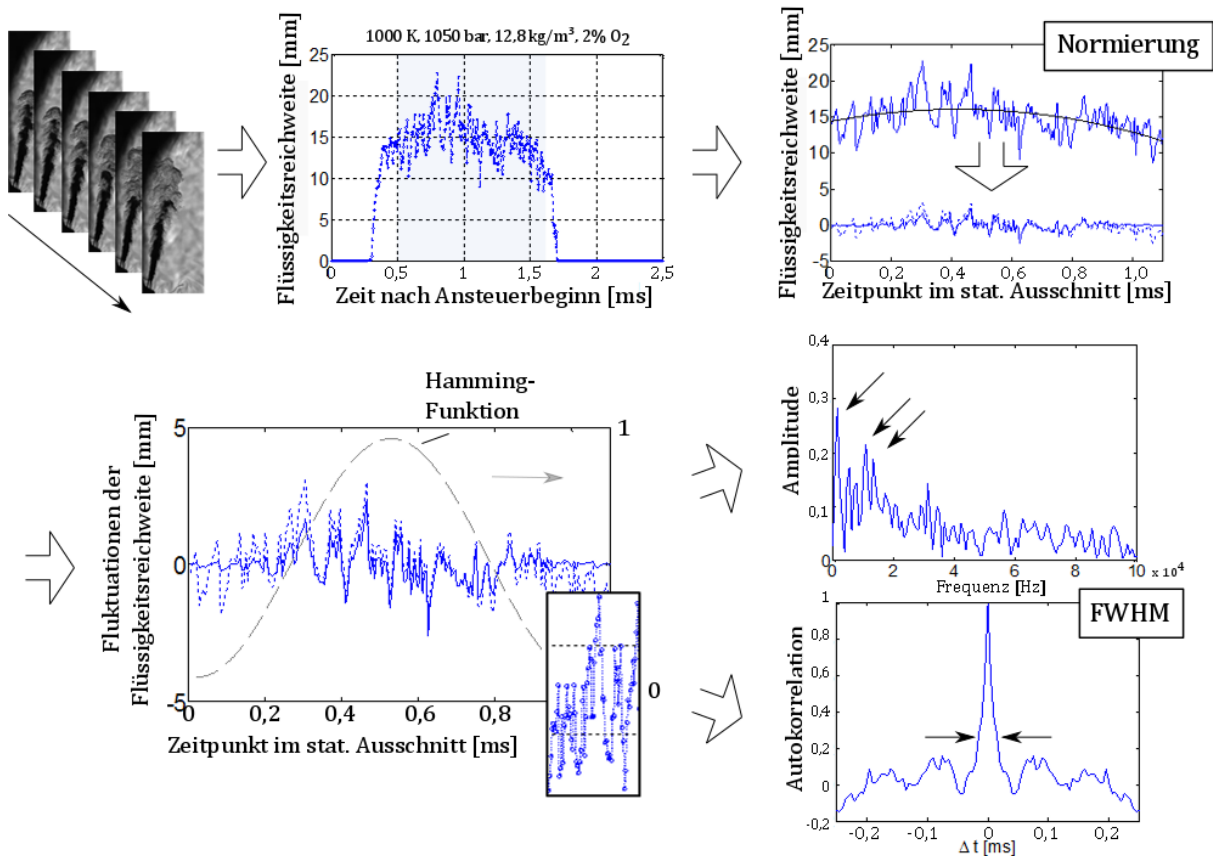


Abbildung 4.10: Analyse der Fluktuationen in der Flüssigkeitsreichweite, dargestellt sind die Schattenaufnahmen des gruppierten Dieselsprays, der gekennzeichnete quasi-stationäre Bereich der Einspritzung, die Normierung der Daten, eine Fensterung der Daten mittels Hamming-Fenster mit einem hineingezoomten Bild des Verlaufs sowie die resultierende Autokorrelation und das FFT-Spektrum der Daten für folgende Bedingungen: $p_E = 1050$ bar, $T_g = 1000$ K, $\rho_g = 12,8$ kg/m³. Der gezoomte Ausschnitt entspricht in etwa zwei Perioden der Fluktuation.

4.4.2 Fluktuationen

Hochgeschwindigkeits-Fluktuationen in der Flüssigkeitsreichweite von Dieselsprays wurden bereits häufig vermerkt, eine erste systematische Analyse des Phänomens wurde von Johnson *et al.* [50, 49] durchgeführt. Die Turbulenz und die innere Strömung im Spritzloch werden als Hauptverursacher des Phänomens identifiziert. Da hierdurch das Risiko der Wandbenetzung erhöht wird, ist eine Betrachtung der Fluktuationen in der Flüssigkeitsreichweite unumgänglich. Der Effekt der Interaktion zweier Einzelsprays auf darauffolgende Fluktuationen wurde bisher noch nicht analysiert. Vorstellbar ist eine Überlagerung der beiden fluktuierenden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse, die die Größe der einzelnen Fluktuation noch verstärkt. Der schlimmste Fall würde eintreffen, wenn die beiden einzelnen Oszillationen kohärent wären, zum Beispiel verursacht durch eine gemeinsame und simultane Veränderung in der Innenströmung der beiden Spritzlöcher.

Ein Überblick zur Ermittlung der Fluktuationen in der Flüssigkeitsreichweite ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Zunächst werden Hochgeschwindigkeitssequenzen der Einspritzung aufgenommen, die

dann über der Zeit ausgewertet werden, sodass die Flüssigkeitsreichweite über der Zeit abgebildet werden kann. Die weitere Auswertung beschränkt sich auf den quasi-stationären Bereich, der den Beginn und das Ende der Einspritzung nicht enthält, wie in Tabelle 4.2 dargestellt. Innerhalb dieses Bereiches ist ein Polynom zweiter Ordnung an den Verlauf der Flüssigkeitsreichweite gefittet. Dieses stellt den Langzeit-Trend der Flüssigkeitsreichweite über den gesamten Zeitraum ohne Berücksichtigung der Fluktuationen dar. Die reinen Fluktuationen sind als Differenz der Flüssigkeitsreichweite zu diesem polynomischen Fit definiert. Die mittlere Amplitude der Fluktuationen errechnet sich durch den quadratischen Mittelwert dieser Differenz. Die weitere Auswertung erfolgt mittels Fourier-Transformation und Autokorrelation. Um *Leck-Effekte*³ zu vermeiden, werden die Daten mit dem Hamming Fenster $w(n) = 0,54 - 0,46 \cos(2\pi n/(N - 1))$; $0 \leq n < N$ multipliziert, wobei N die Anzahl der betrachteten Zeitpunkte darstellt, bevor die *Fast Fourier Transformation* angewandt wird. Für diese Art der Auswertung ist eine hohe Daten- und somit Aufnahmerate essentiell, da die höchste identifizierbare Frequenz durch das *Nyquist-Kriterium* vorgegeben ist und der Hälfte der Aufnahmerate entspricht. Daher wurden alle zur Bestimmung des Frequenzspektrums verwendeten Sequenzen der Flüssigkeitsreichweite mit einer Rate von 200 kfps aufgenommen.

Das FFT-Spektrum der Fluktuationen in der Flüssigkeitsreichweite wird berechnet, um dominante Frequenzen in dieser ausfindig zu machen. Ein repräsentatives Amplitudenspektrum ist in Abbildung 4.10 dargestellt, es kann eine große Anzahl von Peaks entlang des kompletten Spektrums identifiziert werden, mit einer leichten Tendenz hin zu niedrigeren Frequenzen („rosa Rauschen“). Erhebliche Abweichungen von einer Einspritzung zur nächsten verhindern es, einen bedeutenden Frequenzpeak ausfindig zu machen. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Johnson *et al.* [51], die die Fluktuationen der Flüssigkeitsreichweite konventioneller Mehrlochdüsen untersucht haben.

Für alle betrachteten Betriebspunkte ist der Wert der Fluktuationen in der Flüssigkeitsreichweite für die gruppierte Lochdüse, gegeben durch die Standardabweichung, im Bereich von 0,7 – 1,0 mm mit keiner klaren Abhängigkeit verbunden, weder vom Einspritzdruck noch von Umgebungsbedingungen. Für die Referenzdüse, mit analogem Durchfluss SH171, haben die Standardabweichungen die gleiche Größenordnung, ebenfalls unabhängig von äußeren Einflussgrößen. Für die beiden Referenzdüsen mit geringerem Durchfluss liegen die Werte der Fluktuationen leicht darunter, relativ betrachtet jedoch auch im gleichen Bereich. Das Intervall, das von Johnson *et al.* [50] ermittelt wurde, liegt zwischen 0,35 – 0,75 mm leicht darunter.

Die Halbwertsbreite (FWHM) des Autokorrelationspeaks bei $\Delta t = 0$ ist ein Indikator der Dauer eines typischen Fluktuationseignisses während der Einspritzung. Alle anderen Peaks in der Autokorrelation haben eine deutlich geringere Amplitude. Dies deutet darauf hin, dass keine klare oder nur eine schwache Periodizität in den Fluktuationen der Flüssigkeitsreichweite existiert. Die Halbwertsbreite des Autokorrelationspeaks wurde für alle Einspritzungen bestimmt. Wie Abbildung 4.11 zeigt, erstreckt sich der Bereich von 8 – 20 μ s. Die Dauer eines typischen Fluktuationseignisses nimmt mit steigender Temperatur und auch mit steigendem Einspritzdruck leicht ab. Die Fluktuationenwerte der Flüssigkeitsreichweite scheinen nicht von der Umgebungsichte in der Kammer abzuhängen.

³Der *Leck-Effekt* ist ein Phänomen der Signalanalyse und beschreibt den Effekt, dass in einem endlich langen zu untersuchendem Bereich eines Signals Frequenzanteile vorkommen die bei einem unendlich langen Bereich nicht vorkämen. Der Grund hierfür ist das Abschneiden des Signals an den Grenzen.

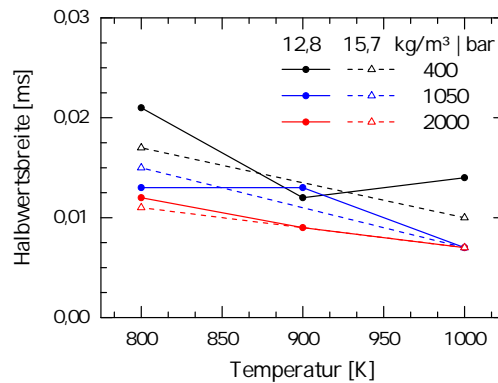


Abbildung 4.11: Über drei Einspritzungen gemittelte Halbwertsbreite (FWHM) der Fluktuationen der Flüssigkeitsreichweite als Funktion der Temperatur T_g , des Einspritzdrucks p_E und der Gasdichte ρ_g

4.4.3 Spraybild im Nahbereich

Das flüssige Kraftstoffspray und die umgebende Gasphase sind in der zugehörigen Abbildung 4.12, in der nur der Nahbereich der Düse aufgenommen ist, gut zu erkennen. Obwohl die Flüssigkeitsreichweite größer ist als der betrachtete Ausschnitt, ist das Ablösen einer Tröpfchenwolke an der Spitze des Sprays in einigen Aufnahmen zu erkennen. In nur wenigen Millimetern Abstand zur Düsen Spitze kann bereits die den flüssigen Kraftstoff umgebende Dampfphase lokalisiert werden. Sowohl die Dampf- als auch die Flüssiggebiete haben keine scharfe Abgrenzungen und es kann eine Ähnlichkeit zu Merkmalen, die in der Literatur als superkritisch gelten, gefunden werden [109, 33, 23]. Es ist kein scharfer Übergang vom eingespritzten flüssigem Kraftstoff zum umgebenden Gas sichtbar, die Phasengrenze verschwimmt. Einzelne Tröpfchen können in den Aufnahmen nicht erfasst werden. Dies kann allerdings auch durch eine nicht ausreichend hohe örtliche Auflösung erklärt werden. Untersuchungen von Wensing *et al.* [109] zeigen, dass der sehr dichte Bereich um den Spraykern mit Schattenaufnahmen dargestellt werden kann. In Streulichtaufnahmen ist dieser Bereich nicht erkennbar. Dies zeigt, dass der Bereich um den Kern des Sprays nicht mehr flüssig ist und als überkritisch betrachtet werden kann. Die theoretische Überprüfung der Ergebnisse zeigt, dass der eingespritzte Kraftstoff nicht verdampft, sondern sich in einem überkritischen Zustand ohne Veränderung der Dichte befindet.

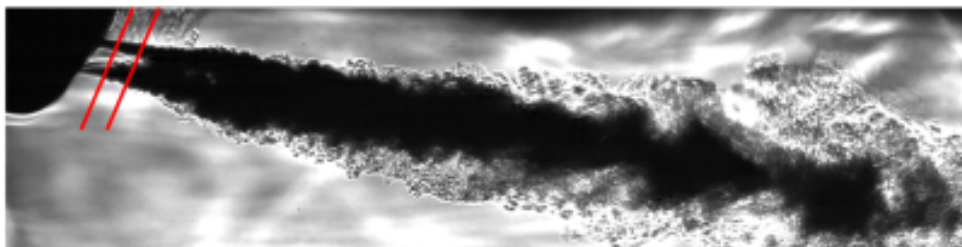


Abbildung 4.12: Aufnahme des Nahbereichs der gruppierten Lochdüse GH121, Ausschnitt 5 mm \times 18 mm für eine Temperatur von $T_g = 1000 \text{ K}$, einen Einspritzdruck von $p_E = 1050 \text{ bar}$ und eine Dichte von $\rho_g = 12,8 \text{ kg/m}^3$. Intensitätsprofile werden in Höhen von 0,5 mm und 1,0 mm (rote Linien) ausgewertet.

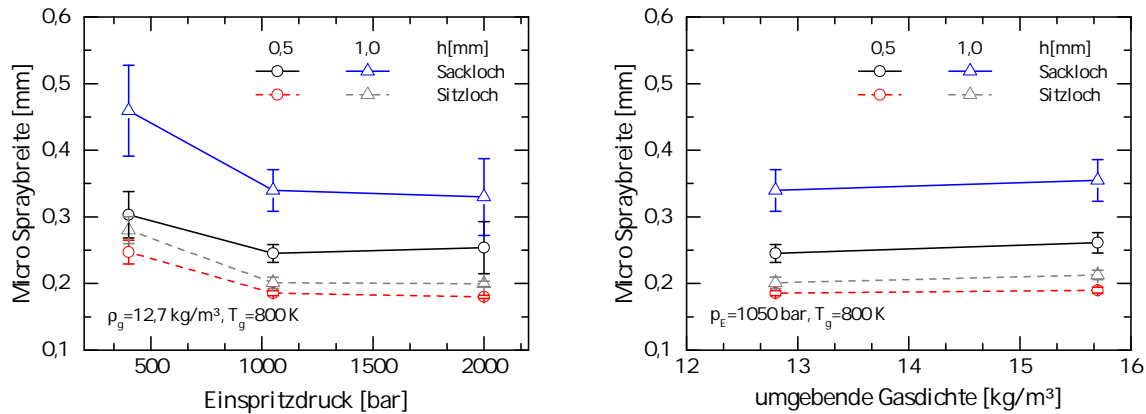


Abbildung 4.13: *Micro* Spraybreite aufgetragen über dem Einspritzdruck p_E links und über der umgebenden Gasdichte ρ_g rechts, jeweils für eine Umgebungstemperatur von $T_g = 800 \text{ K}$. Die Microspraybreite wird in einem Abstand von 0,5 und 1 mm vom Düsenaustritt ausgewertet.

In den meisten Fällen kann die *Micro* Spraybreite der gruppierten Einzelsprays direkt aus den Aufnahmen bestimmt werden. Um die Spraygrenzen zu lokalisieren, wird die Ableitung der Intensitätsprofile entlang der skizzierten Linien aus Abbildung 4.12 nach lokalen Minima und Maxima durchsucht. Der Abstand zwischen zwei entsprechenden detektierten Punkten ist die Breite eines der beiden Einzelsprays. Die resultierenden Werte müssen überprüft und validiert werden, da die Spraybreite nicht auf allen Bildern ausgewertet werden kann, da starke Schliereffekte den Sprayschatten überdecken können.

Die Resultate dieser Auswertung sind in Abbildung 4.13 zusammengefasst. Die Werte sind zeitliche Mittelwerte aus dem quasi-stationären Bereich der Einspritzung, die Fehlerbalken stellen die zeitliche Standardabweichung in dem betrachteten Zeitfenster dar. Es ist leicht ersichtlich, dass die *Micro* Spraybreite mit größerer Distanz von der Düse ansteigt und dass das Spray der Sacklochdüse wesentlich breiter ist als das Sitzlochspray. Ein leichter Anstieg der *Micro* Spraybreite mit ansteigender Gasdichte und eine Abnahme der *Micro* Spraybreite mit ansteigendem Einspritzdruck von $p_E = 400 \text{ bar}$ auf 1050 bar ist zu vermerken. Bei einem weiteren Anstieg des Einspritzdrucks auf 2000 bar ist keine zusätzliche Veränderung mehr erkennbar. Die Ergebnisse ergänzen die im vorherigen Abschnitt 4.3 gezeigten Untersuchungen bei Umgebungsbedingungen, bei denen eine detailliertere Untersuchung des Sprays im Nahbereich der Düse möglich ist. Bei höheren Gastemperaturen ($T_g > 800 \text{ K}$) ist eine Auswertung der *Micro* Spraybreite nicht mehr so gut möglich.

Die Stabilität der Einzelsprays ist, wie auch bei Umgebungsbedingungen (Abschnitt 4.3), für das Sitzlochspray deutlich höher. Der aus dem Sitzloch austretende Kraftstoff strömt durch einen schmalen Kanal zwischen Nadel und Düsenkörper. Eine starke Umlenkung der Strömung am Einlass in das Spritzloch macht das Spritzloch nur von oberhalb befüllbar. Für die tiefer liegenden Spritzlöcher, die ihren Einlass im Sackloch haben, kann der Kraftstoff von oberhalb, wo er durch die Sitzlochreihe gestört werden kann, und vom Sackloch, von unten, in das Spritzloch strömen. Die zusätzlichen Freiheitsgrade bei der Einströmung in das Sackloch sind eine mögliche Erklärung für die höhere Fluktuation des Sacklochsprays. Durch die Betrachtung der Referenzdüsen im vorigen Abschnitt zeigt sich, dass die Fluktuationen typisch für Sitz- und Sacklochdüsen sind und

keine Besonderheit der gruppierten Lochdüse darstellen. Sie treten bei dieser im gleichen Maß auf, wie es bei einer reinen Sitz- bzw. Sacklochdüse der Fall ist.

4.4.4 Verdampfungsverhalten in der Gesamtbetrachtung

Durch die Charakterisierung des Verdampfungsverhaltens der gruppierten Lochdüse und der Referenzdüsen zu Vergleichszwecken kann das zu erwartende Verhalten der Sprays im Motor vereinfacht abgebildet werden. Zerstäubung, Verdampfung und Gemischbildung der gruppierten Lochdüse ist der Referenzdüse SH171 mit gleichem hydraulischem Durchmesser sehr ähnlich. Auch Flüssigkeitsreichweite und Fluktuationen entsprechen den Werten der Referenzdüse SH171.

Die Auswertung ist hierbei im Vergleich zu Messungen bei Umgebungstemperatur erschwert. Durch auftretende Schliereffekte können die Form und auch die Flüssigkeitspenetration des Sprays nicht mehr ganz so einfach ausgewertet werden wie bei Aufnahmen bei Umgebungstemperatur. Je höher Temperatur und Dichte in der der Kammer sind, desto schwieriger und mit mehr Unsicherheiten behaftet ist die Auswertung.

Bei Messungen in der Brennkammer ist der Aufwand für eine einzelne Messung sehr umfangreich, deswegen können pro Betriebspunkt nur drei Messungen durchgeführt werden. Die Mittelung und statistische Absicherung ist daher nur begrenzt möglich. Durch die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera kann immerhin die komplette Einspritzung aufgenommen und somit auch über den quasi-stationären Bereich während einer Einspritzung gemittelt werden und für eine statistische Absicherung innerhalb einer Einspritzung sorgen.

4.5 Sprayimpuls

Mittels der intrusiven Strahlkraftmesstechnik können Informationen über die Verteilung des Kraftstoffs im Spray gewonnen werden. Die Struktur des Sprays kann über den Zeitraum der Einspritzung dargestellt werden. Außerdem lässt sich die Strahlkraft der verschiedenen Düsen messen. Nachteilig ist jedoch, dass das Spray durch den Pin gestört wird und dies sich in ungünstigen Fällen sogar stromaufwärts bemerkbar machen kann, sodass eine Beeinflussung der Messgröße selbst durch die Anwesenheit des Pins nicht auszuschließen ist. Vorteilhaft ist jedoch der Einblick in die dichten achsennahen Bereiche des Sprays, der aufgrund von starker Extinktion und Mehrfachstreuung für die optischen Techniken unzugänglich ist.

4.5.1 Impulsprofile

Durch die Verwendung des kleinen Pins kann die Impulsstruktur der gruppierten Lochdüse im Detail aufgelöst werden. Informationen über die Verteilung des Impulses innerhalb der beiden Einzelsprays sind abbildbar. Auch Unterschiede zwischen den beiden Einzelsprays, die über optische Untersuchungen nicht zugänglich sind, können veranschaulicht werden.

Zweidimensionale Impulsprofile für zwei verschiedene Abstände von der Injektorachse ($r = 5$ und 10 mm, die Düsenöffnungen befinden sich $1,41$ bzw. $1,51$ mm von der Injektorachse entfernt) sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Die Breite der Spraystrukturen, die vom Strahlkraftsensor aufgenommen werden, ist deutlich geringer als die der entsprechenden optischen Aufnahmen.

Die Momentenverteilung zeigt im Nahbereich der Düse ($r = 5$ mm, (Abbildung 4.14 oben), dass die beiden einzelnen Peaks der gruppierten Lochdüse bereits im Nahfeld beginnen sich zu überlappen, jedoch noch separierbar sind. In diesem Abstand zur Achse können die beiden Einzelsprays optisch bereits nicht mehr getrennt werden.

Eine leichte Asymmetrie entlang des Höhenwinkels hält sich bis hin zu hohen Abständen von der Injektorachse. In Abbildung 4.14 (unten) ist die Sprayimpulsverteilung für den größeren Abstand von $r = 10$ mm abgebildet. Das Referenzspray zeigt weiterhin eine kreisrunde Ausbreitung mit dem Maximum im Zentrum, das auch bei größeren Distanzen höher ist als das Maximum, das für die gruppierte Lochdüse im Bereich des Sitzlochsprays zu finden ist. Dies deutet an, dass die äußeren Tröpfchenwolken des Sprays bereits in einem Abstand $r = 3$ mm von der Injektorachse beziehungsweise 1,5 mm nach dem Düsenaustritt überlappen. Die Impulsverteilung der Referenzdüse SH171 mit gleichem Massendurchfluss (rechts in Abbildung 4.14) ist annähernd rund und scheint entlang des Seitenwinkels minimal breiter zu sein. Der maximale Impulswert kann im Zentrum der Verteilung gefunden werden und ist für das Referenzspray SH171 deutlich höher als für das gruppierte Spray GH121. Bemerkenswert an der Impulsverteilung der gruppierten Düse GH121 ist der signifikant geringere Gesamtimpuls des unteren Sprays, des Sacklochsprays im Vergleich zum Sitzlochspray. Dies ist kein transienter Effekt, da die Bilder einen leicht früheren Beginn der Einspritzung für das Sackloch zeigen und der Unterschied über den kompletten Zeitverlauf sichtbar ist. In Winkel gemessen scheint das Spray zwischen den Abständen $r = 5$ mm und 10 mm kleiner zu werden. Das erinnert an die nicht-konische Struktur, die mittels Röntgen in Leick [61] gemessen wurde. Die unteren vier Diagramme in Abbildung 4.14 zeigen die Impulsverteilung der Referenzdüsen SH121 *Sack* links und SH121 *Sitz* rechts. In der oberen Reihe ist der Impuls für einen Abstand von $r = 5$ mm dargestellt, in der darunter für $r = 10$ mm. Die beiden Referenzsprays zeigen in beiden Abständen eine kreisrunde Ausbreitung, die ihr Maximum im Zentrum hat. Auffallend ist der geringe Impuls des Sacklochsprays in beiden Abständen. Somit bestätigen sich bei den Referenzdüsen die Beobachtungen, die schon bei der gruppierten Lochdüse gemacht wurden: Das Sacklochspray hat einen geringeren maximalen Impuls. Auf der betrachteten Ebene ist auch die Summe geringer.

Der integrierte Gesamtimpuls über eine Fläche von $10^\circ \times 10^\circ$ ist in Tabelle 4.3 dargestellt. Er ist nach folgender Gleichung

$$M_{\text{ges}} = \sum \frac{M_i A_i}{A_s} \quad (4.1)$$

berechnet, wobei M_i den Impulswert des Flächenelements i , A_i die Größe des Flächenelements i ($A_i = \text{Schrittweite SW} \times \text{Schrittweite HW}$) und A_s die sensitive Fläche des Pins darstellt. Dieser ist sowohl in einem Abstand von 5 als auch von 10 mm von der Injektorachse für das gruppierte Spray geringer als für das Referenzspray. Die Differenz wird in größerem Abstand geringer. In den Messungen in einem Abstand von $r = 5$ mm ist der untersuchte Bereich sehr eng um die Spraygrenzen gewählt. Die Unterschiede zwischen gruppiertem Lochdüse und Referenzdüse sind größer als nach den HDA-Messungen zu erwarten. In größerem Abstand ist um das Spray deutlich mehr Raum, der für die Impulsbetrachtung noch zum Spray gezählt wird, was die Unterschiede im eigentlich durch Impulserhaltung geprägten Mechanismus erklären kann. Außerdem ist der Impuls davon abhängig, wie das Spray umströmt wird. Die Veränderung im Gesamtimpuls für die gruppierte Lochdüse für steigenden Abstand ist nicht gut erklärbar, für die Referenzdüse bleibt der Gesamtimpuls in etwa gleich. Der leicht niedrigere Wert in geringerem Abstand ist durch den kleineren Messbereich erklärbar.

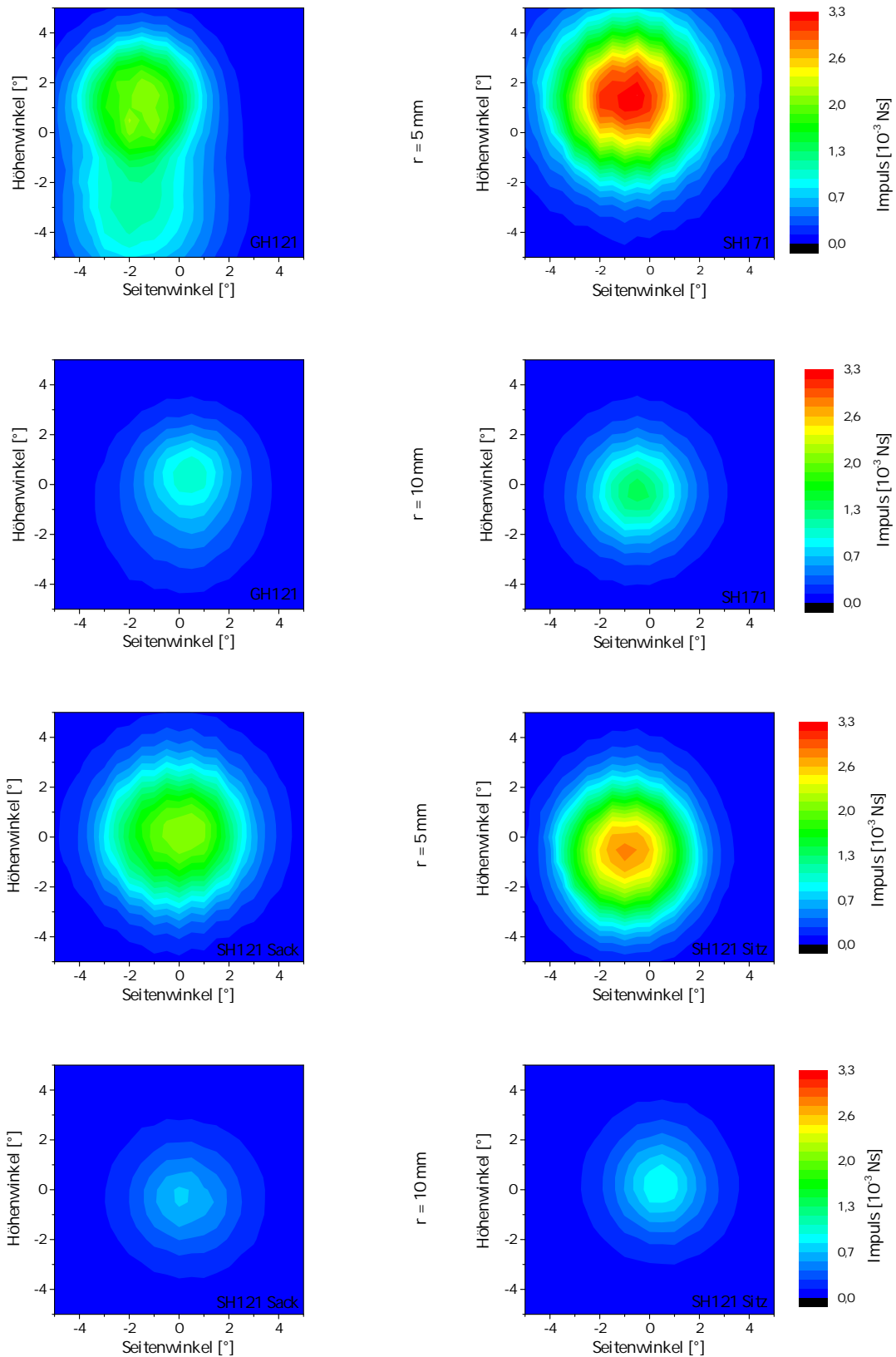


Abbildung 4.14: Sprayimpulsverteilung für die gruppierte Lochdüse GH121 (links, das Sacklochspray ist bei den geringeren Werten des Höhenwinkels) und für die Referenzdüse SH171 (rechts) in einem Abstand von $r = 5 \text{ mm}$ (obere Reihe) und 10 mm (untere Reihe) von der Injektorachse. In den unteren vier Abbildungen ist links SH121 Sack und rechts SH121 Sitz abgebildet, Einspritzdruck $p_E = 1050 \text{ bar}$, Umgebungstemperatur, $\rho_g = 23 \text{ kg/m}^3$.

Abstand [mm]	Gesamtimpuls GH121 [Ns]	Gesamtimpuls SH171 [Ns]
$r = 5$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
$r = 10$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 4.3: Integrierter Gesamtimpuls für zwei verschiedene Abstände von der Injektorachse. Einspritzdruck $p_E = 1050$ bar, Umgebungstemperatur, $\rho_g = 23 \text{ kg/m}^3$.

Impulsprofile durch das Sprayzentrum entlang des Höhenwinkels ($SW = \text{konstant}$) (Abbildung 4.15) ermöglichen eine detaillierte Diskussion der Spraystruktur in den verschiedenen Abständen r zur Injektorachse. Die Separation der beiden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse ist bis zu einem Abstand von $r = 7 \text{ mm}$ von der Injektorachse möglich (Abbildung 4.15 oben rechts). Dieser entspricht der fast vierfachen *Interaktionsdistanz*, die in optischen Experimenten ermittelt werden konnte. Eine Asymmetrie des Impulses der gruppierten Lochdüse kann bis zu einem Abstand von 12 mm registriert werden. Für höhere Abstände scheint sich auch für die gruppierte Lochdüse die zylindrische Form des Sprays durchzusetzen. Das Zentrum des vereinigten Sprays liegt deutlich näher an der Position des Sitzlochs als an der des Sacklochs. Für all die betrachteten Profile ist der maximale Impuls des Referenzsprays SH171 höher, die Verteilung entlang des Höhenwinkels ist jedoch für die gruppierte Lochdüse breiter. Dies zeigt, warum die integrierten Impulswerte deutlich weniger voneinander abweichen als die Maximalwerte in der Impulsstrukturmessung.

In einem Abstand von $r = 4 \text{ mm}$ können die beiden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse am deutlichsten unterschieden werden. Der Gesamtimpuls liegt bei einer betrachteten Fläche von $13,5^\circ \times 13,5^\circ$ bei $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ns}$, der sich unterschiedlich auf Sack- und Sitzloch verteilt: Der Impuls des Sacklochsprays entspricht 44 % des Gesamtimpulses, für das Sitzlochspray bleiben 56 %. Die ungleichmäßige Verteilung zwischen Sitz- und Sacklochspray bleibt über die gesamte Einspritzung erhalten.

Dies deutet auf ein ungleichmäßiges Anströmen der beiden Spritzlöcher des Spritzlochpaares im Inneren der gruppierten Lochdüse hin. Eine eventuell weitere Ausbreitung des Sacklochsprays kann auch zu einem höheren Impuls im Zentrum des Sitzlochsprays führen. Der Impuls für das sich weiter ausweitende Spray ist im Zentrum geringer, da größere Anteile des Sprays weiter nach außen verteilt werden. Ein Fehler an den Düsen kann ausgeschlossen werden, denn die Düsen wurden sowohl vor als auch nach der Messung überprüft. Der Durchmesser der beiden Spritzlöcher und der theoretische Massendurchfluss ist somit gleich.

In der unteren Reihe der Abbildung 4.15 sind die Impulsprofile der beiden Referenzdüsen SH121 mit geringerem hydraulischen Durchfluss dargestellt. Beim Vergleich der beiden Varianten zeigt sich, dass der maximale Impuls für die Sitzlochvariante deutlich höher liegt, bei einem Abstand von $r = 5 \text{ mm}$ ist der Impuls um 10^{-3} Ns höher. Dafür ist das Sacklochspray breiter, das bedeutet, der Gesamtimpuls ist ähnlich, der Spitzenimpuls in der Mitte nicht. Dies bestätigt den Trend, der auch schon bei der gruppierten Lochdüse beobachtet werden konnte. Mit weiterem Abstand von der Injektorachse nimmt der Unterschied zwischen den beiden Spraytypen ab. Ab einem Abstand von $r = 12 \text{ mm}$ gleichen sich die Profile. Für die beiden Referenzdüsen mit geringerem Spritzlochdurchmesser SH121 ist die Verteilung des Impulses wie erwartet schmaler.

Vergleich zu optischen Aufnahmen In optischen Aufnahmen ist die Form der beiden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse GH121 gut auflösbar. Die fein zerstäubten Ränder der beiden Einzelsprays gehen in einem Abstand von $1,5 \text{ mm}$ ineinander über und können nicht mehr vonein-

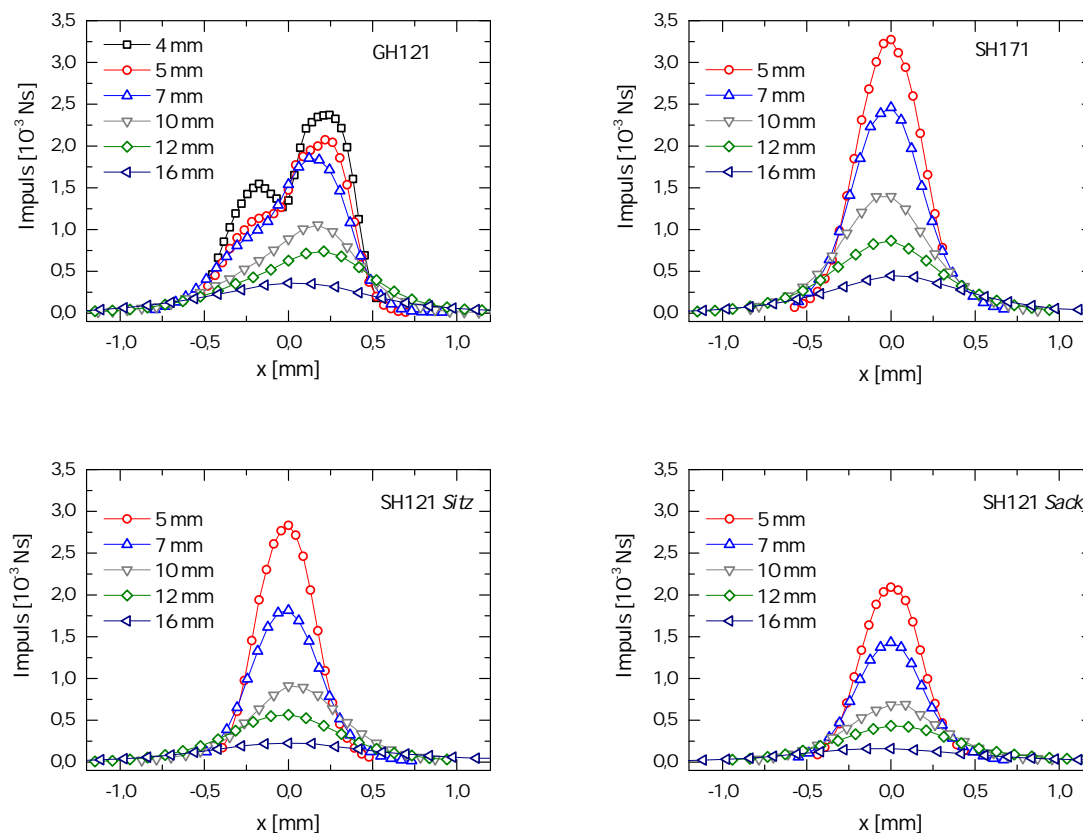


Abbildung 4.15: Impulsprofile der vier betrachteten Sprays in verschiedenen Abständen r zur Injektorachse. Einspritzdruck $p_E = 1050$ bar, Umgebungstemperatur, $\rho_g = 23 \text{ kg/m}^3$. Kugelkoordinaten wurden in kartesische Koordinaten umgerechnet.

ander unterschieden werden. Durch die Untersuchungen des Sprayimpulses ist eine Separierung der beiden Einzelsprays bis zu einem Abstand von 7 mm von der Düsen Spitze möglich. Die über den Impuls ermittelte Breite des Sprays liegt ab einem Abstand von $r = 4$ mm bei 1 mm, für Schattenaufnahmen ist die Spraybreite der gruppierte Lochdüse schon in einem Abstand von $r = 3$ mm höher. Bei den Impulsmessungen bleibt die Breite des Sprays über den Abstand auf konstantem Level, in den optischen Messungen hingegen nimmt die Breite mit dem Abstand immer weiter zu. Die Tröpfchenwolke um den engen Kern des Sprays breitet sich im Laufe der Einspritzung immer weiter aus. Ab einem Abstand von $r = 12$ mm kann kein direkter Kern des Sprays mehr identifiziert werden, der Impuls über den Abstand ist in allen Bereichen ähnlich.

Der Sensor detektiert die Regionen nah an der Sprayachse, in denen das Spray sehr dicht ist, während die kleinen Tröpfchen im Randbereich des Sprays in optischen Aufnahmen mit abgebildet werden. Der Randbereich macht nur einen kleinen Anteil der Gesamtspraymasse aus. Die optische Dichte der Tröpfchen ist jedoch ausreichend, um die Transmission des Lichts zu verhindern. Ähnliche Unterschiede im Kegelwinkel des Dieselsprays sind bereits aus dem Vergleich von optischen Messungen zu Röntgenaufnahmen bekannt [54, 61], da die Absorption von Röntgenstrahlung proportional zur Kraftstoffmasse ist.

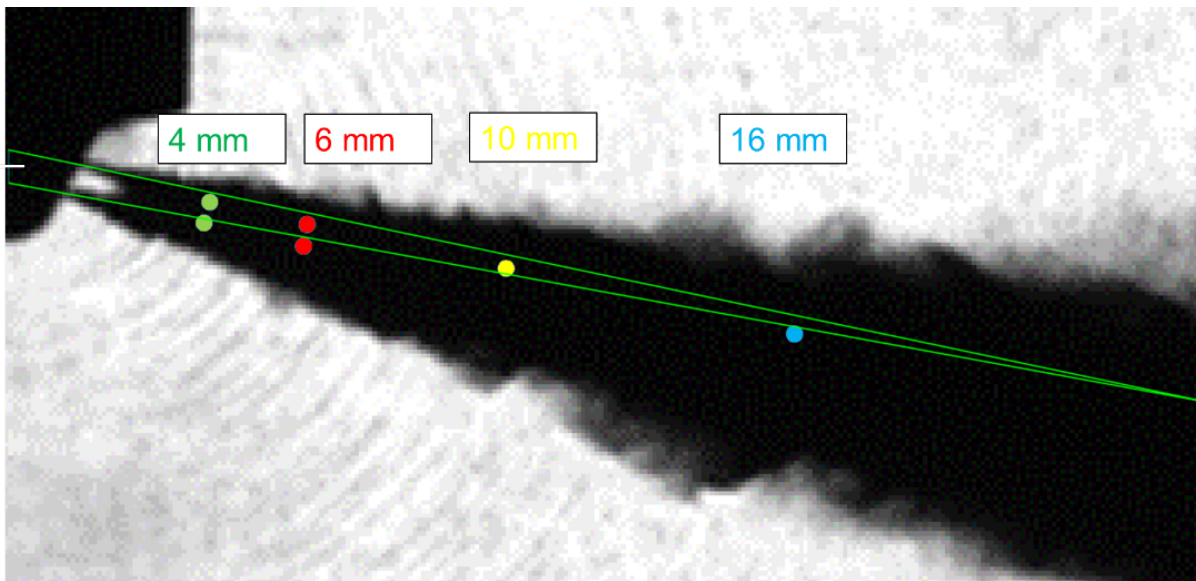


Abbildung 4.16: Schattenaufnahme des gruppierten Sprays GH121 für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar bei $t = 925 \mu\text{s}$ mit markierten Impulsmaxima in den jeweiligen Abständen

Der Sensor detektiert die Regionen nah an der Sprayachse, in denen das Spray sehr dicht ist, während die kleinen Tröpfchen im Randbereich des Sprays in optischen Aufnahmen mit abgebildet werden. Der Randbereich macht nur einen kleinen Anteil der Gesamtspraymasse aus. Die optische Dichte der Tröpfchen ist jedoch ausreichend, um die Transmission des Lichts zu verhindern. Ähnliche Unterschiede im Kegelwinkel des Dieselsprays sind bereits aus dem Vergleich von optischen Messungen zu Röntgenaufnahmen bekannt [54, 61], da die Absorption von Röntgenstrahlung proportional zur Kraftstoffmasse ist.

Abbildung 4.16 zeigt den Vergleich der gemessenen Positionen der Impulsmaxima mit einer Schattenaufnahme der gruppierten Lochdüse. Die Bohrungen der beiden Düsenlöcher und die Skizze, unter welchem Winkel die Sprays ohne Ablenkung verlaufen würden, sind mit grünen Linien dargestellt. Bei der gruppierten Lochdüse ist der Sensor auf das mittlere A-Maß⁴ beider Spritzlöcher ausgerichtet, dargestellt durch den Strich zwischen den Spritzlöchern. An den Stellen, an denen sich die farbigen Markierungen befinden, sind die maximalen Impulse von Sack- und Sitzlochspray, bzw. in weiteren Abständen vom vereinigten Spray dargestellt. In einem Abstand von 4 mm sind die Impulsmaxima im Zentrum des durch die Schattenaufnahmen dargestellten Sprays zu finden. Je weiter entfernt die Impulsmaxima aufgenommen wurden, desto stärker sind sie nach oben zum Sitzloch verschoben. Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, befindet sich das Impulsmaximum nicht im Zentrum des abgebildeten Sprays, sondern ist, verglichen mit der in den Schattenaufnahmen dargestellten Spraystruktur, in Richtung des Sitzloches verschoben. Das Spray breitet sich im Vergleich zu seinem geometrisch erwartetem Verlauf vor allem nach unten, in Richtung des Sackloches, aus.

Dass sich das Spray der gruppierten Düse weiter nach unten ausdehnt, kann durch den generell weiteren Kegelwinkel des Sacklochsprays verursacht werden. Dieses Spray weist auch den geringeren Impuls auf und wird, falls genauso viel Flüssigkeit durch das Spritzloch strömt, schneller abgebremst und mit Luft durchmischt. Durch die schnellere Aufweitung und Durchmischung oder durch die geringere eingespritzte Menge kann am Sacklochspray eine schnellere Gemischbildung stattfinden,

⁴Das A-Maß gibt die Position, in der sich der Düsenlocheinlauf befindet, wieder

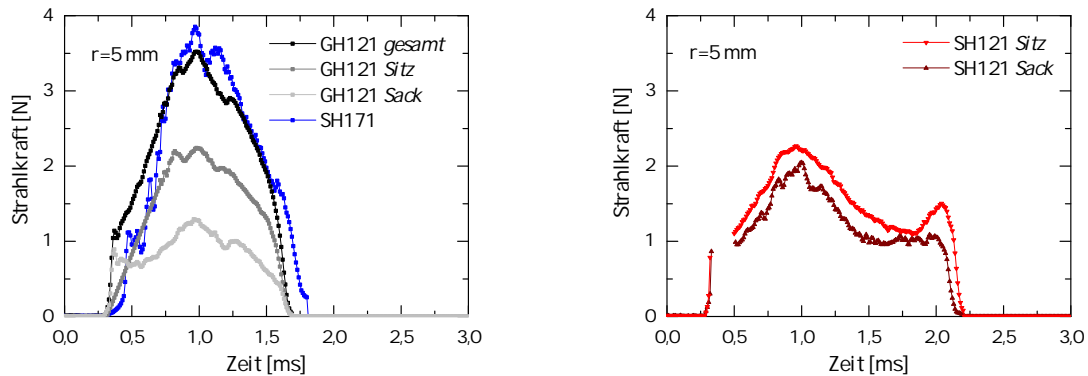


Abbildung 4.17: Strahlkraftverlauf im Zentrum des Sprays für einen Abstand von $r = 5 \text{ mm}$ von der Injektorachse für die gruppierte Lochdüse GH121 gesamt und aufgeteilt in Sitz- und Sackloch, sowie für die Referenzdüse SH171 links, für die beiden Referenzdüsen SH121 *Sitz* und *Sack* rechts. Daten zu Beginn der Messung aufgrund eines unplausiblen, zu hohen Kraftausschlags ausgeblendet. Messungen bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050 \text{ bar}$.

was auch die Erkenntnisse der Flüssigkeitsreichweite aus Abschnitt 4.4.1 bestätigen. Da die eingespritzte Menge zumindest bei der Sitz- und Sacklochvariante gut übereinstimmt (vergleiche mit Abschnitt 4.2), kann zumindest bei diesen Düsen davon ausgegangen werden, dass das Sacklochspray düsennäher zerstäubt wird.

4.5.2 Zeitlicher Strahlkraftverlauf

Der zeitliche Verlauf der Strahlkraft im Spraymaximum ist in Abbildung 4.17 für einen Abstand von $r = 5 \text{ mm}$ dargestellt. Die linke der beiden Abbildungen zeigt den Strahlkraftverlauf der gruppierten Lochdüse aufgeteilt in Sitz- und Sacklochdüse. Es ist jeweils der Verlauf der Strahlkraft im Maximum dargestellt, außerdem die Summe aus beiden. Auch im zeitlichen Verlauf im jeweiligen Sprayzentrum wird klar, dass im Bereich des Sitzlochs eine stärkere Kraft auf den Sensor wirkt. In einem Abstand von $r = 5 \text{ mm}$ ist die Kraft im Maximum für das Sitzloch in etwa doppelt so hoch wie für das Sackloch. Der Strahlkraftverlauf aus der Summe der beiden stimmt mit dem der Referenzdüse mit gleichem hydraulischem Durchfluss SH171 in weiten Teilen überein. Der erreichte Maximalwert liegt $0,2 \text{ N}$ unter dem der Referenzdüse SH171, ansonsten gleichen sich die Verläufe.

In der Abbildung 4.17 rechts ist der zeitliche Strahlkraftverlauf der beiden Referenzdüsen SH121 *Sitz*- und *Sack* dargestellt. Hierbei liegt die maximal erreichte Strahlkraft für die Sitzlochvariante im kompletten zeitlichen Verlauf um ca. $0,2 \text{ N}$ höher als für die Sacklochvariante. Durch die längere Einspritzung, die dem langsameren Schließen des Injektors geschuldet ist, ist das Maximum nicht so stark ausgeprägt, sondern auf einen breiteren Zeitraum verteilt. Am Ende der Einspritzung ist für das Sitzlochspray nochmals ein leichter Anstieg der Strahlkraft zu verzeichnen. Das Sitzlochspray der gruppierten Lochdüse erreicht einen ähnlichen Verlauf wie das Referenz-Sitzlochspray SH121. Der Verlauf des Sacklochsprays der gruppierten Düse hingegen liegt im Wert deutlich unter dem des Referenz-Sacklochsprays. Bei Summierung der beiden Strahlkraftverläufe der Referenzdüsen ist die Gesamtkraft höher als beim Referenzspray SH171 mit doppeltem Massendurchsatz.

4.5.3 Strahlkraftmessungen in der Gesamtbetrachtung

Mit Hilfe von Strahlkraftmessungen kann der Einspritzverlauf sehr detailliert aufgelöst werden. Zusätzlich kann durch die Verwendung eines kleinen Pins mit einem Durchmesser von $d = 0,5 \text{ mm}$ die Spraystruktur der gruppierten Lochdüse durch Traversierung eines Pins innerhalb einer normal zur Sprayachse liegenden Ebene aufgelöst werden. Diese Profile geben detaillierte Auskunft über das Aufbruchverhalten und die Impulsverteilung im Spray. Die Breite der Impulsverteilung ist dabei geringer als die Spraybreite, die unter gleichen Bedingungen mittels optischer Verfahren (Schattenaufnahmen) ermittelt wird. Durch Nutzung des kleinen Pins ermöglicht die Strahlkraftmesstechnik eine detaillierte Abbildung des Spraykerns der gruppierten Düse. Die Separation der beiden Sprays und die auffällige ungleichmäßige Verteilung zwischen Sitz- und Sackloch können nicht mit optischen Messtechniken, sondern nur mit der invasiven Strahlkraftmesstechnik aufgelöst werden.

Durch Verwendung des kleinen Pins ($d = 0,5 \text{ mm}$) sind Messungen in geringen Abständen zur Düsenpitze und bei hohen Einspritzdrücken problematisch. Die Strahlkraftverläufe können nur fehlerhaft aufgezeichnet werden, da der Pin im Gehäuse an der Membran des Drucksensors anschlägt oder das Gehäuse mit zu viel Kraftstoff gefüllt ist. Sobald der Einspritzdruck abnimmt oder der Abstand zur Düsenpitze zunimmt, können Messungen ohne Störsignal durchgeführt werden. Es scheint, dass sich ein minimales Spiel zwischen dem Schaft des Pins und der Membran des eigentlichen Drucksensors aufbaut.

Durch die intrusive Messtechnik, bei der der Pin direkt durch das Spray fährt, kann es zur Beeinflussung der gemessenen Größe kommen. Der Pin sollte während der Messung annähernd senkrecht zur Hauptströmungsrichtung orientiert sein, sodass die gemessene Kraft der des Sprays entspricht. Neben den Spraytröpfchen, die auf den Pin treffen, wird auch die miteingezogene Luft, die um den Pin strömt, im Kraftverlauf detektiert. Der Anteil der Luft steigt mit höherer Distanz zur Düse immer weiter an. Im Nahfeld der Düse kann davon ausgegangen werden, dass hauptsächlich das Spray vom Sensor detektiert wird. Wenn Tröpfchen nicht senkrecht vom Pin abprallen, sondern zurück reflektiert werden, übertragen sie einen höheren Impuls auf den Sensor und schirmen ihn auch gleichzeitig gegen nachfolgende Tröpfchen ab. In besonders dichten Dieselsprays, die vor allem im Nahbereich der Düse vorkommen, spielen diese Effekte eine wichtige Rolle und erschweren die Interpretation und die quantitative Auswertung der gemessenen Kraftverläufe.

4.6 Airentainment

Die gemessene Airentainmentgeschwindigkeit gibt Aufschluss darüber, wie viel umgebendes Gas in das Spray gezogen wird und somit zur Gemischbildung beiträgt. Je früher und je mehr Luft sich mit dem eingespritzten Kraftstoff vermischt, desto schneller ist die Gemischbildung. Durch PIV-Messungen kann die Geschwindigkeit der Strömung in das Spray in der Lichtschnittebene ermittelt werden.

Die gruppierten Lochdüsen werden, unter den im vorigen Abschnitt gezeigten dieselmotorähnlichen Bedingungen, an der Brennkammer (vgl. Abschnitt 3.3.2) untersucht. Die Hochgeschwindigkeitsmessungen werden sowohl bei Raumtemperatur als auch unter heißen Bedingungen durchgeführt. Es wird über einen Zeitbereich von $0,25 \text{ ms}$ gemittelt, das entspricht fünf ausgewerteten Vektorfeldern zu fünf aufeinanderfolgenden Zeitpunkten. Bei schlechter Bildqualität aufgrund von

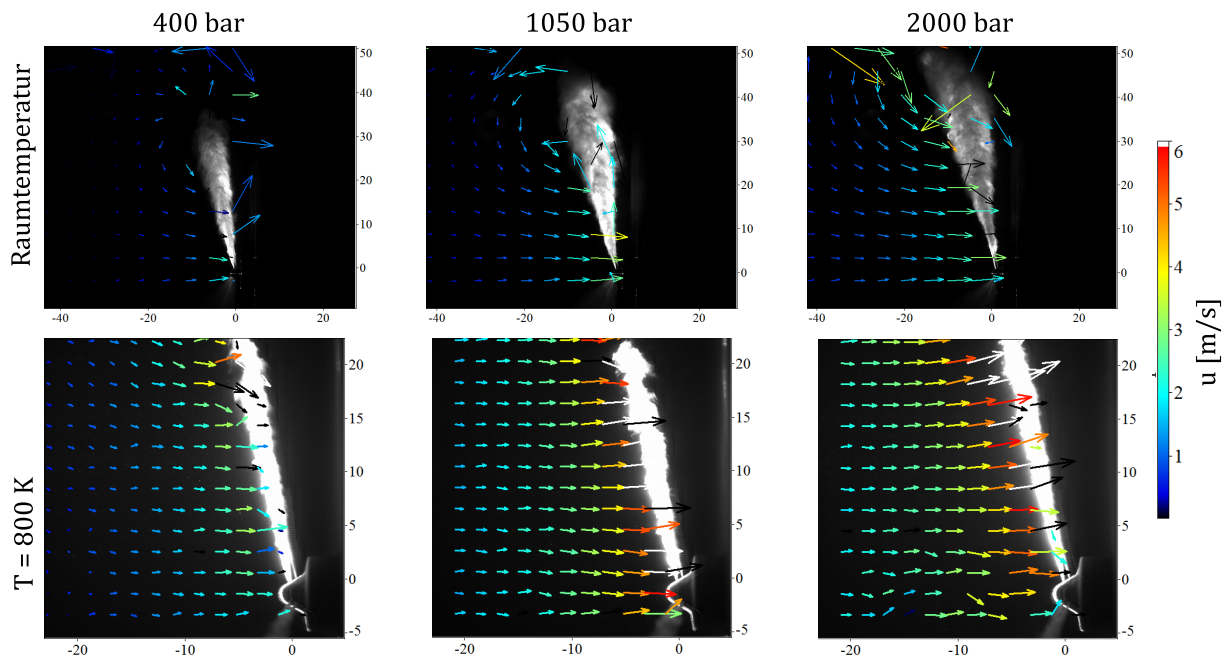


Abbildung 4.18: Geschwindigkeitsverteilung des Strömungsfeldes an der gruppierten Lochdüse GH121 bei $t_{\text{ASOI}} = 0,5 \text{ ms}$ für drei verschiedene Einspritzdrücke $p_E = 400, 1050$ und 2000 bar bei geringer Vergrößerung für Raumtemperatur (oben) und für eine Temperatur von $T_g = 800 \text{ K}$ (unten). Der Druck in der Kammer liegt bei $p_g = 1,2 \text{ bar}$. Die betrachteten Bereiche sind für die Temperaturen leicht unterschiedlich. Ausschnitt bei Raumtemperatur $70 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, bei $T_g = 800 \text{ K}$ $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$.

Beam-Steering-Effekten ist ein Preprocessing der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen notwendig. Hierbei ist der Abzug eines gleitenden Hintergrunds sowie eine Normierung der Partikelintensität hilfreich. Ein mehrstufiger Kreuzkorrelationsalgorithmus wird anschließend verwendet, um die Einzelbilder von zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten der Hochgeschwindigkeitsaufnahme zu korrelieren. Dabei wird das Resultat von Zeitpunkt t als Anfangswert für den Partikelversatz zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ verwendet. Aufgrund der niedrigen Auflösung der Hochgeschwindigkeitskamera ($768 \times 768 \text{ Pixel}$, Photron SA1) werden im letzten Iterationsschritt kleine Interrogationsfenster von $8 \times 8 \text{ Pixel}$ verwendet.

Abbildung 4.18 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung des Strömungsfeldes an der GH121-Düse bei drei verschiedenen Einspritzdrücken für zwei verschiedene Betriebspunkte: In der oberen Reihe dargestellt sind Untersuchungen bei Raumtemperatur für unterschiedliche Einspritzdrücke, in der unteren Reihe für die gleichen Einspritzdrücke bei einer Temperatur von $T = 800 \text{ K}$ und einer Dichte von $\rho_g = 12,8 \text{ kg/m}^3$. In Abbildung 4.19 sind Aufnahmen mit einem Fernfeldmikroskop bei gleichen Bedingungen unter hoher Vergrößerung dargestellt.

Das Spray unterscheidet sich je nach Umgebungstemperatur und -druck stark. Bei Raumtemperatur findet keine Verdampfung des Dieselsprays statt, sodass Penetration und Kegelwinkel des flüssigen Sprays eine deutlich größere Ausbreitung aufzeigen. Im heißen Fall stellt sich ein Gleichgewicht zwischen nachströmenden, flüssigen Kraftstofftröpfchen und der Verdampfung ein, sodass sich die Flüssigkeitsreichweite auf einen konstanten Wert einstellt. Dies bestätigt die unter Abschnitt 4.4 gezeigten Ergebnisse.

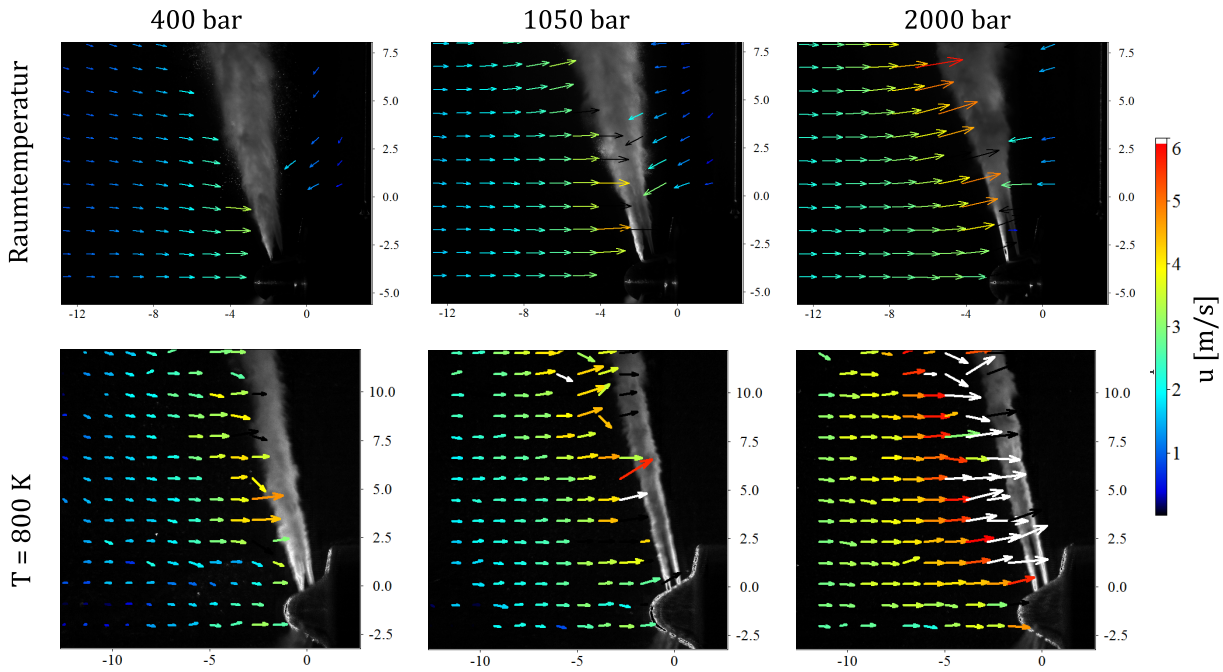


Abbildung 4.19: Geschwindigkeitsverteilung des Strömungsfeldes am GH121 bei $t_{\text{ASOI}} = 0,5$ ms für drei verschiedene Einspritzdrücke $p_E = 400, 1050$ und 2000 bar bei starker Vergrößerung für Raumtemperatur (oben) und einer Temperatur von $T_g = 800$ K (unten). Ausschnitt bei Raumtemperatur $17 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$, bei $T_g = 800$ K $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$.

Zwei wesentliche Eigenschaften des Entrainments sind zu erkennen: Mit steigendem Druck nehmen auch die Entrainmentgeschwindigkeiten in das Spray zu [40, 48]. Außerdem sind die Entrainmentgeschwindigkeiten unter motorähnlichen Bedingungen ($\rho_g = 23,1 \text{ kg/m}^3$, $T_g = 800 \text{ K}$) deutlich höher als bei den Untersuchungen bei Raumtemperatur. Die Entrainmentgeschwindigkeit steigt zur Sprayachse hin immer weiter an. Das Maximum liegt direkt am Sprayrand. Parallel zur Sprayachse ist auf den globalen Aufnahmen für motorähnliche Bedingungen die größte Geschwindigkeit in das Spray in einem Abstand von $z = 20 \text{ mm}$ vom Düsenaustritt zu finden, der Bereich direkt am Spray kann in diesen Aufnahmen nicht ausgewertet werden. Bei Raumtemperatur zeigen sich die höchsten Geschwindigkeiten im Nahbereich der Düse. Hier kann die Auswertung auch noch in deutlich geringeren Abständen zum Spray sinnvolle Werte liefern.

Bei Betrachtung des Entrainments im Nahbereich in Abbildung 4.19 bei gleichen Betriebspunkten wie in der vorherigen Abbildung 4.18 sind die beiden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse gut separierbar. Das Entrainment kann bis zum Spray aufgelöst und abgebildet werden. Dies ist im Vergleich zu den Aufnahmen bei geringer Vergrößerung vorteilhaft, da der Bereich direkt am Spray dort nicht ausgewertet werden kann. Bei den Nahfeldaufnahmen können direkt im Sprayrandbereich höhere Geschwindigkeiten detektiert werden als auf den globalen Aufnahmen. Die Trends der Geschwindigkeitsverteilung aus den globalen Aufnahmen des einzelnen Sprays bestätigen sich. Der Lichtschnitt kommt in den Aufnahmen von links. Beide Sprays können nur aufgrund von Mehrfachstreuung abgebildet werden. Die Vektorfelder, die mittels globaler und Micro-Ansicht ermittelt werden, stimmen gut überein.

Abbildung 4.20 zeigt eine Aufnahme der PIV-Partikel bei Raumtemperatur (links) und bei motorähnlichen Bedingungen rechts ($T_g = 1000 \text{ K}$). Für Umgebungsbedingungen ist eine feine weit verteilte Partikelstruktur wahrnehmbar. Außerdem kann die Düse scharf abgebildet werden.

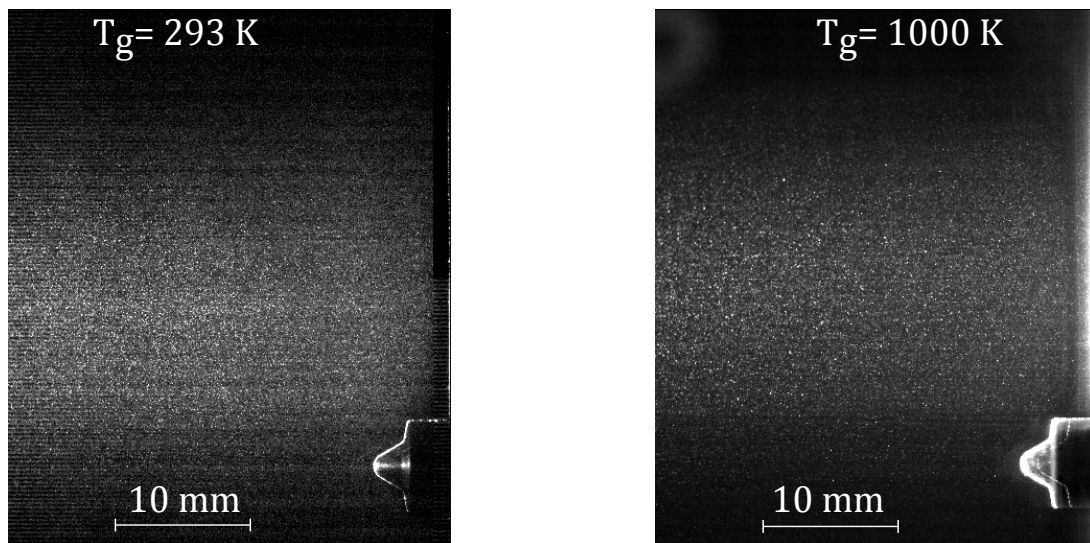


Abbildung 4.20: Darstellung der TiO_2 -Partikel in der Brennkammer bei Umgebungstemperatur (links) und für $T_g = 1000 \text{ K}$

Bei heißen Bedingungen hingegen ist die Abbildung der Düse nicht mehr scharf möglich. Die Verteilung der aufgenommenen Partikel ist nicht mehr so homogen und flächig. Einzelne Partikel werden vergrößert abgebildet, außerdem sind im Nahbereich der Düse weniger Partikel verteilt. Zur Auswertung mittels PIV-Algorithmus sind beide Seeding-Dichten ausreichend [84].

4.6.1 Zeitlicher Airentrainementverlauf

Für die Ermittlung des zeitlichen Airentrainementverlaufs stehen Vektorfelder zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb einer Einspritzung zur Verfügung. Jedes der ermittelten Vektorfelder ist ein Mittelwert aus den Vektorfeldern von 50 Einzelaufnahmen. Dies ist einerseits vorteilhaft, da ein detaillierter qualitativer Einblick in den zeitlichen Verlauf des Entrainments gewonnen werden kann. Andererseits ist es schwierig, ein aussagekräftiges Maß zu finden, welches es erlaubt, verschiedene Einspritzungen bei unterschiedlichen Betriebspunkten oder verschiedener Düsen in ihrer Gesamtheit zu vergleichen.

Abbildung 4.21 zeigt den zeitlichen Verlauf des Entrainments an der GH121-Düse bei $p_E = 1050 \text{ bar}$, $\rho_g = 15,7 \text{ kg/m}^3$ und $T_g = 800 \text{ K}$. Während der Einspritzung gibt es eine Phase, in der sich die folgenden Gemeinsamkeiten für das Strömungsfeld zeigen. Zu Beginn der Einspritzung ist keine Bewegung in der Strömung detektierbar, die Vorverbrennung hat somit keinen Einfluss auf die Einspritzung. Sobald Flüssigkeit zerstäubt wird, ist eine Hauptströmungsrichtung parallel zur Injektorachse erkennbar, diese ist nur zu Beginn und am Ende der Einspritzung nicht ausgeprägt. Die Hauptströmungsrichtung ist nicht senkrecht zum Spray, sondern um 11° dazu geneigt, sodass sie parallel zur Injektorachse verläuft. Dies kann an der Interaktion der drei Spraypaare liegen, die hier jedoch nicht weiter untersucht werden kann. Das Strömungsfeld ist ausgeprägt, sobald das Spray das Ende des Bildausschnittes nach $t = 450 \mu\text{s}$ erreicht. Das in das Spray einströmende Gas erfährt eine Beschleunigung zum Spray hin parallel zur Injektorachse. Die Bereiche mit den höchsten Geschwindigkeiten befinden sich in unmittelbarer Spraynähe und sind parallel zur Sprayachse verteilt. Im zeitlichen Verlauf der Einspritzung scheint der Bereich mit der höchsten

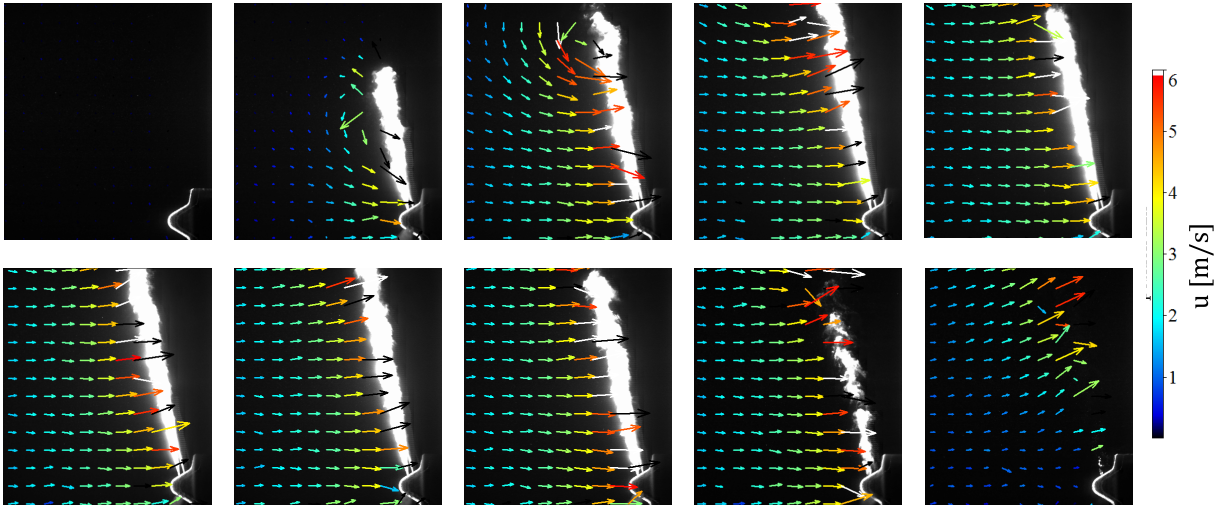


Abbildung 4.21: Zeitlicher Verlauf des Entrainments an der gruppierten Lochdüse GH121. Betrachteter Bildausschnitt $14\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050\text{ bar}$, bei einer Temperatur von $T_g = 800\text{ K}$ und einer Dichte von $\rho_g = 12,8\text{ kg/m}^3$. Der Abstand zwischen den Aufnahmen beträgt $\Delta t = 200\text{ }\mu\text{s}$, die Anzahl der Bildpaar pro Vektorfeld ist 50.

Airementmentgeschwindigkeit immer weiter in Richtung der Düsen spitze zu wandern. Mit dem Ende der Einspritzung bricht auch das Strömungsfeld zusammen.

4.6.2 Vergleich des Entrainments für verschiedene Düsen

Die einzelnen Einspritzvorgänge und die dadurch induzierten Strömungen im gesamten betrachteten Ausschnitt unterscheiden sich lediglich durch die Beträge der Geschwindigkeiten. Für eine quantitative Erfassung des zeitlichen Verlaufs des Entrainments im gesamten Messbereich wird deshalb für jeden Zeitpunkt der Einspritzung der Mittelwert der Beträge aller Vektoren eines Vektorfelds nach Gleichung

$$\overline{|u|} = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} |u_{ij}|}{N_x N_y} \quad (4.2)$$

gebildet, wobei u_{ij} die Geschwindigkeit am Punkt i, j ist, die über die Summe N_x und N_y berechnet wird. Abbildung 4.22 zeigt diese Verläufe exemplarisch für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050\text{ bar}$. Die Ergebnisse der anderen beiden betrachteten Einspritzdrücke sind vom Verlauf ähnlich und skalieren mit der Bernoulli Geschwindigkeit $\sqrt{2(p_E - p_g)/\rho_f}$.

Folgende generelle Aussagen können von den Geschwindigkeitstrends, dargestellt in Abbildung 4.22, abgeleitet werden:

- Das Entrainment entwickelt sich binnen 150 ms nach Einspritzbeginn und bleibt über die komplette Einspritzung mehr oder weniger auf gleichem Niveau.
- Wie erwartet, ist die gemittelte Entrainmentgeschwindigkeit für die Referenzdüse SH121 *Sitz* Düse, die nur über den halben Massendurchfluss der anderen beiden verfügt, deutlich geringer. Das Entrainmentströmungsfeld ist hier für $0,5\text{ ms}$ länger anhaltend, übereinstimmend zu der länger andauernden Einspritzung, aufgrund des langsameren Nadelschließen bei geringerem

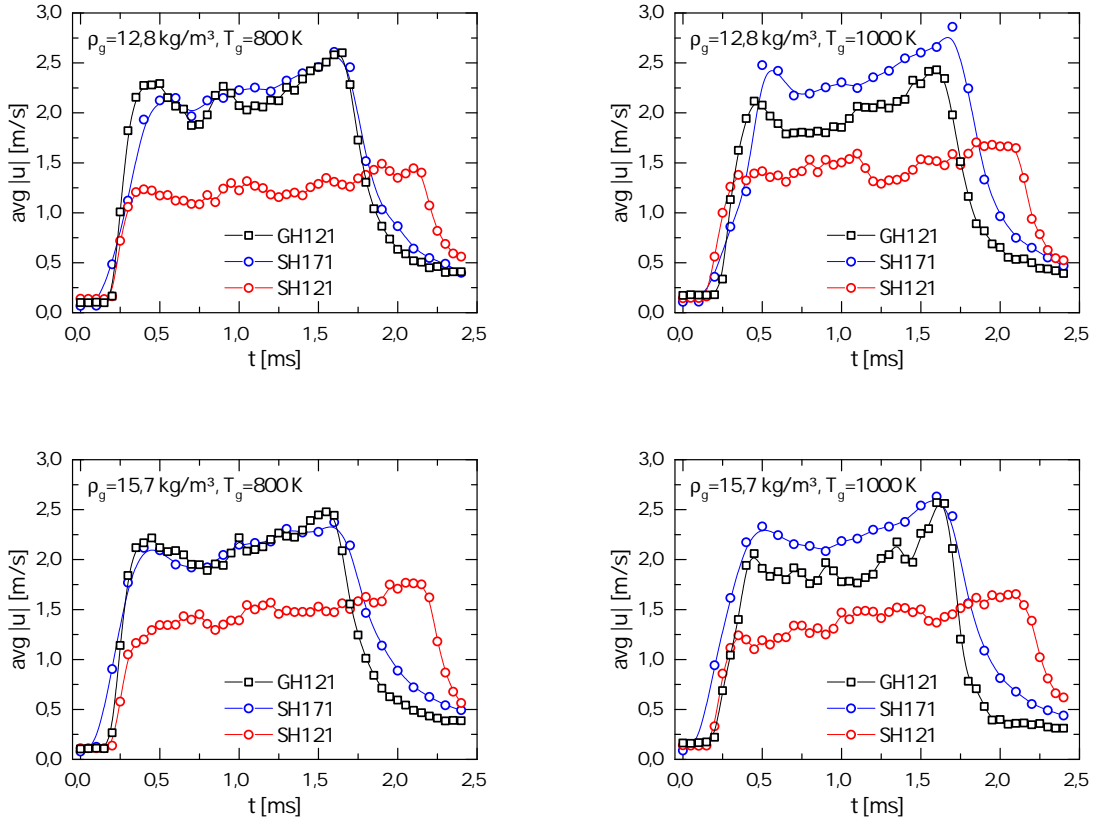


Abbildung 4.22: Zeitlicher Verlauf des Mittelwertes aller Geschwindigkeitsbeträge $\overline{|u|}$ im Messbereich für einen Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar für die gruppierte Lochdüse sowie für die Referenzdüsen SH171 und SH121 Sitz für verschiedene umgebende Temperaturen und Gasdichten, Mikrogebiet (vgl. Abbildung 4.19)

hydraulischen Durchfluss. Durch das schnellere Öffnen ist der Weg zurück für die Nadel länger.

- Die Entwicklung der Strömungsfelder der gruppierten Lochdüse GH121 und der Referenzdüse SH171 ist sehr ähnlich und erreicht im absoluten Wert das gleiche stationäre Level. Die Unterschiede, die bei einer Temperatur von $T_g = 1000$ K zu erkennen sind (Abbildung 4.22 rechts), kommen von extrem starken *Beam-Steering*-Einflüssen bei hohen Temperaturen, die die PIV-Auswertung deutlich erschweren und somit zu höheren Unsicherheiten in den Ergebnissen bei einer Umgebungstemperatur von $T_g = 1000$ K führen.

Für die drei untersuchten Düsen zeigt sich ein ähnlicher und kontinuierlicher Anstieg in der Entrainmentgeschwindigkeit im quasi-stationären Bereich. Für die axial in das Spray strömende Entrainmentgeschwindigkeit eines voll entwickelten Sprays können keine konsistenten Trends in der Literatur gefunden werden. Die auf den Düsennahbereich limitierten Ergebnisse passen zu denen von Arbeau *et al.* [9]. Der Anstieg der Entrainmentgeschwindigkeit mit Anstieg der Umgebungsdichte passt zu den in der Literatur gezeigten Messungen, die allerdings bei Umgebungstemperatur stattfanden [41]. Die Durchmischung ist für höhere Umgebungsdichten verbessert. Die ermittelte Geschwindigkeit $\overline{|u|}$ scheint recht unabhängig von den Umgebungsbedingungen T_g

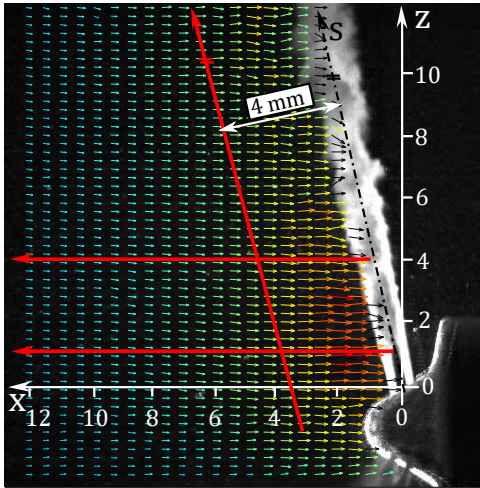


Abbildung 4.23: Darstellung der Profile, die für die detaillierte Untersuchung des Entrainments im Nahbereich der Düse verwendet werden. Dargestellt ist die GH121-Düse mit einem Einspritzdruck von $p_E = 1050$ bar, einer Temperatur von $T_g = 800$ K und einer Dichte von $\rho_g = 12,8 \text{ kg/m}^3$ zum Zeitpunkt t_1 .

und ρ_g . Der Unterschied zwischen der gruppierten Lochdüse und der Referenzdüse scheint größer als $\propto d$ zu sein.

Um das Entrainment detaillierter zu betrachten, werden ein axiales und zwei horizontale Profile im Nahfeld der Düse definiert, die in Abbildung 4.23 dargestellt sind. Das erste horizontale Profil liegt in einem Abstand von $z_s = 1 \text{ mm}$, in diesem sind die beiden Einzelsprays der gruppierten Düse noch unterscheidbar. Das zweite horizontale Profil ist in einem Abstand definiert, in dem die beiden Einzelsprays bereits verschmolzen sind ($z_s = 4 \text{ mm}$). Um den Einfluss von störenden Spraytröpfchen in der PIV-Auswertung zu vermeiden, hat das Profil parallel zur Sprayachse einen Abstand von 4 mm . In diesem Abstand können die höheren Geschwindigkeiten sprayabwärts gefunden werden, was dem Trend der höheren Geschwindigkeiten an der Düsen Spitze näher am Spray ($z \leq 4 \text{ mm}$) gegenübersteht. Nur direkt am Spray können die höchsten Geschwindigkeiten in Düsen Nähe ermittelt werden. Bei Auswertung direkt am Sprayrand ist der Einfluss der Spraytröpfchen zum Teil zu hoch, sodass nicht immer eine saubere Auswertung erfolgen kann. Mit den Profilen werden zwei unterschiedliche Zeitbereiche betrachtet, der erste quasi-stationäre Bereich der Einspritzung bei $t_1 = 0,6 \pm 0,2 \text{ ms}$ und der zweite gegen Ende der Einspritzung bei $t_2 = 1,5 \pm 0,2 \text{ ms}$ für GH121 und SH171, $t_2 = 2 \pm 0,2 \text{ ms}$ für die längere Einspritzung der SH121 Sitzlochdüse. In den folgenden Diagrammen werden die Entrainmentgeschwindigkeiten der SH121 Sitzlochdüse mit dem Faktor $\sqrt{2}$ multipliziert, um den Einfluss der verschiedenen Massenströme nach Gleichung 2.9, Abschnitt 2.2 zu kompensieren.

Die Profile parallel zur Sprayachse sind in Abbildung 4.24 dargestellt. Für alle drei betrachteten Sprays ist ein Anstieg der Geschwindigkeit vom Zeitpunkt t_1 (Abbildung oben links) nach t_2 (Abbildung oben rechts) erkennbar. Vor allem im Nahbereich der Düse ist die Airentrainmentgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t_2 höher. Ansonsten sind keine großen Unterschiede erkennbar. Die Verlässlichkeit der Messungen bei $T_g = 1000$ K kann aufgrund von Beam-Steering-Effekten und der sich daraus ergebenden schwierigen Auswertung nicht gewährleistet werden. Dies ist in der unteren Reihe der Abbildung 4.24 rechts erkennbar. Die Geschwindigkeitsprofile sind unvollständig, da nicht alle Positionen ausgewertet werden können oder unplausible Werte bestimmt werden. Bei geringeren Umgebungstemperaturen von $T_g = 800$ K (Abbildung 4.24 links) treten geringere oder

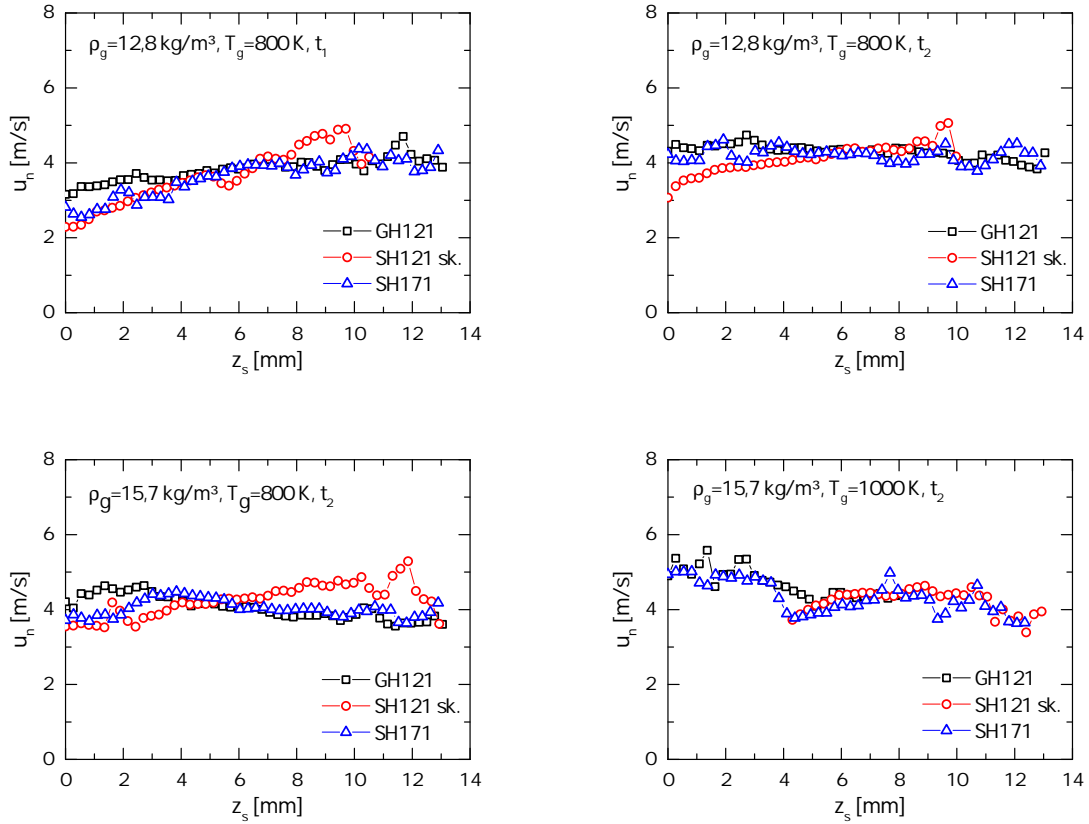


Abbildung 4.24: Profile der Entrainmentgeschwindigkeit in einem Abstand von $z_s = 4 \text{ mm}$ parallel zur Sprayachse. Einspritzdruck $p_E = 1050 \text{ bar}$, für die verschiedenen Zeitpunkte t_1 und t_2 (oben) und für unterschiedliche Umgebungstemperaturen T_g (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für die drei betrachteten Düsen, für SH121 sind die Werte entsprechend skaliert (sk.).

keine Effekt durch Beam-Steering auf, hier kann der komplette Bereich ausgewertet werden. Alle weiteren dargestellten Profile sind deshalb für Messungen bei $T_g = 800 \text{ K}$ und zum Zeitpunkt t_2 veranschaulicht.

Bis auf die vorher diskutierten Restriktionen können die Messungen als präzise und aussagekräftig betrachtet werden. Die relevanten Indikatoren einer PIV-Auswertung, wie das Verhältnis aus erstem und zweitem Korrelationspeak, sind zufriedenstellend. Die ermittelten Gasgeschwindigkeiten liegen für alle Düsen in einem definierten Bereich. Zumindest für die Bildebene, in der die Untersuchungen stattfanden, ist die Entrainmentgeschwindigkeit der gruppierten Lochdüse fast identisch zu der Referenzdüse SH171 mit selben hydraulischem Durchfluss. Das hervorgerufene Entrainment skaliert mit dem Spritzlochdurchmesser wie nach Gleichung 2.9 angenommen. Gerade für die gruppierte Lochdüse kann jedoch erwartet werden, dass kein symmetrisches Airentrainment zustande kommt. Das Ergebnis stimmt perfekt mit den in Abschnitt 4.4 gezeigten Untersuchungen überein. Diese zeigen, dass die Flüssigkeitsreichweite auch zum *effektivem* Lochdurchmesser proportional ist, vom dem der Massendurchfluss des Injektors abhängig ist [45]. Somit passen die Ergebnisse auch zu den einfachen Spraymodellen von Siebers und Kollegen [96, 71], nach dem beides, Entrainment und Flüssigkeitsreichweite, proportional zum Spritzlochdurchmesser ist.

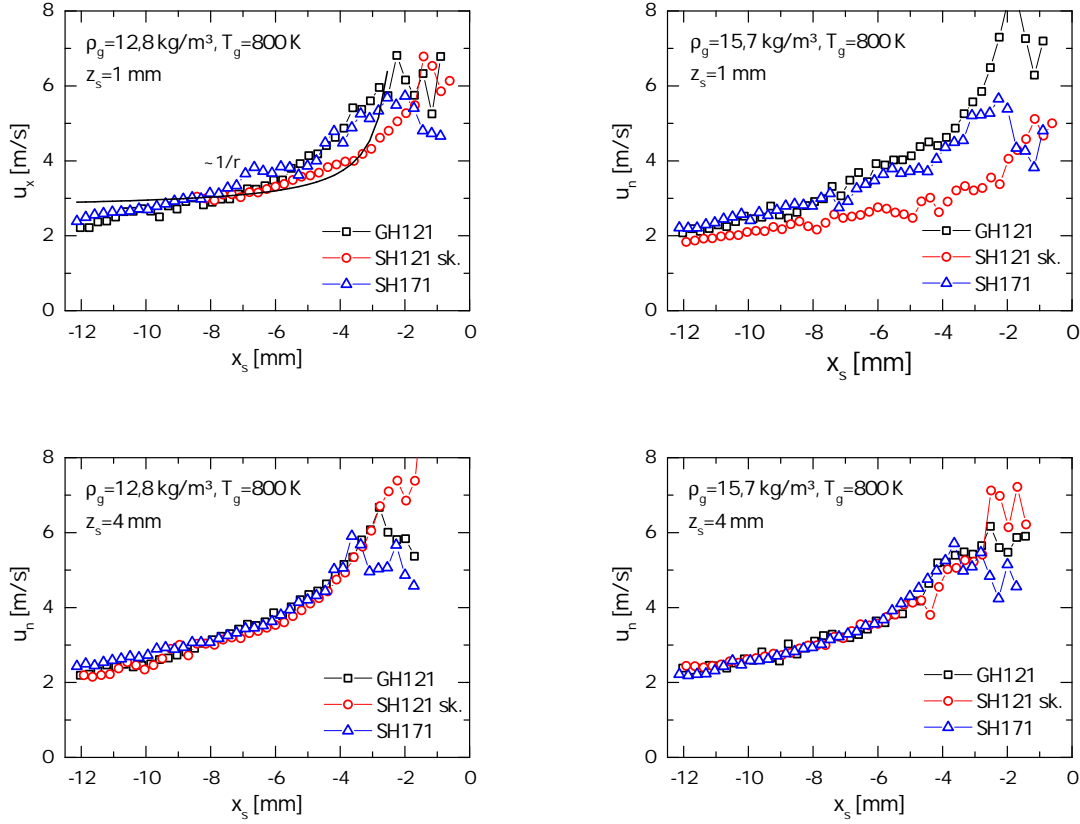


Abbildung 4.25: Horizontale Profile der Entrainmentgeschwindigkeit in einem Abstand von $z_s = 1 \text{ mm}$ (oben) und $z_s = 4 \text{ mm}$ (unten). Dargestellt bei einem Einspritzdruck von $p_E = 1050 \text{ bar}$, einer Temperatur von $T_g = 800 \text{ K}$ und variierender Gasdichte. Dargestellt sind die Ergebnisse für die drei betrachteten Düsen zum Zeitpunkt t_2 . Im ersten Diagramm ist die $1/r$ -Abhängigkeit eingezeichnet.

Das Airentainment und die Flüssigkeitsreichweite der gruppierten Lochdüse lassen sich mit dem effektiven Lochdurchmesser einer konventionellen Düse abbilden.

Die horizontalen Profile sind in Abbildung 4.25 gezeigt. In diesen Abbildungen zeigt sich ein minimaler Unterschied in der Entrainmentströmung zwischen der gruppierten Lochdüse und den Referenzdüsen, jedoch nur im Nahfeld ($z_s = 1 \text{ mm}$, Abbildung 4.25, oben). Sobald die gruppierten Sprays überlappen ($z_s = 4 \text{ mm}$, Abbildung 4.25, untere Reihe), ist kaum mehr ein Unterschied im Airentainment zu erkennen. Für den geringeren Abstand ($z_s = 1 \text{ mm}$, Abbildung 4.25, obere Reihe) ist das Entrainment vor allem nah an der Sprayachse ($x_s < 5 \text{ mm}$) und für höhere Gasdichten von $\rho_g = 15,7 \text{ kg/m}^3$ (rechte Abbildung) im Vergleich zu den Referenzdüsen leicht erhöht. Im ersten Diagramm von Abbildung 4.25 ist die Abhängigkeit $u_n \propto 1/r$ eingezeichnet. Die entlang des Profils gemessenen Geschwindigkeiten verhalten sich entsprechend dieser Abhängigkeit. Für die als vereinfacht betrachteten zylindersymmetrischen Sprays kann dieser Trend als einfache Folge der Erhaltung des Massenstroms angenommen werden.

4.6.3 Entrainment in der Gesamtbetrachtung

Die Untersuchungen zeigen, dass das Airentrainement – vor allem im Nahbereich der Düse – der gruppierten Lochdüse mit dem der Referenzdüse mit gleichem effektiven Durchmesser und somit gleichem hydraulischen Durchfluss vergleichbar ist. Die gruppierte Lochdüse kann somit über eine konventionelle Düse mit gleichem effektiven Durchmesser charakterisiert werden. Nur in dem Bereich, in dem die zwei Einzelsprays der gruppierten Lochdüse noch unterscheidbar sind, zeigt sich eine etwas höhere Entrainmentgeschwindigkeit.

Die ermittelten Airentrainmentgeschwindigkeiten für die gruppierte Lochdüse können nur über die im Lichtschnitt betrachtete Ebene eine Auskunft geben. Die gesamte Entrainmentströmung ist jedoch stark dreidimensional ausgeprägt. Durch die nicht zylindrische Form des gruppierten Sprays können die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf das Gesamtspray übertragen werden. Die untersuchten Düsen haben drei Spritzlochpaare, sodass der Bereich zwischen den Sprays andere Strömungsbedingungen aufweist als an der Außenseite der Sprays. Das Airentrainment der Referenzsprays kann hingegen näherungsweise als rotationssymmetrisch angenommen werden, sodass ein Vergleich nur in der betrachteten Ebene sinnvoll ist.

Die Messbedingungen eignen sich nur zum Teil für die Messungen. Je höher die Temperatur in der Brennkammer, desto stärker die Beam-Steering-Effekte. Die Lichtstrahlen werden durch Gas-schichten mit unterschiedlicher Dichte und somit unterschiedlichen Brechungsindizes unregelmäßig abgelenkt, sodass in der Sensorebene der Kamera keine scharfe Abbildung mehr entsteht. Dies ist insbesondere bei den Betriebspunkten mit einer Temperatur von $T_g = 1000\text{ K}$ der Fall, bei denen die Einspritzung bereits 0,8 s nach der Vorverbrennung einsetzt und die Atmosphäre in der Kammer noch sehr inhomogen ist. Der Effekt wird bei Nutzung durch die hohe Vergrößerung des Fernfeldmikroskops verstärkt. Zusätzlich kommt es zu einer Ablenkung des Lichtschnitts selbst, der dadurch teilweise nicht mehr in der Schärfenebene der Kamera liegt. Die Auswertung der Bilder war in den meisten Fällen trotzdem möglich, allerdings ist die Qualität der Ergebnisse oft beeinträchtigt.

4.7 Zusammenfassung und Fazit

Optische Messtechniken und die Untersuchung mittels Strahlkraft wurden angewandt, um sowohl den Nahbereich als auch das komplette Spray einer gruppierten Lochdüse mit zwei fast parallelen, interagierenden Dieselsprays zu charakterisieren. Hierbei wurden detaillierte Betrachtungen des Sprays bei Umgebungsbedingungen und bei Bedingungen, die denen im Motor zum Einspritzzeitpunkt ähneln, angestellt. Drei sich unterscheidende Referenzdüsen, eine mit gleichem Durchfluss und jeweils eine mit gleichem Durchmesser und gleicher Anordnung des Spritzlochs, wurden verwendet, um die Ergebnisse abzugleichen. Alle Düsen sind als Drei-Loch(paar)-Varianten gefertigt, um einen optimalen optischen Zugang und gleichzeitig realistische Innenströmungsbedingungen zu gewährleisten.

Die makroskopischen Eigenschaften der gruppierten Lochdüse entsprechen denen der Referenzdüse mit gleichem hydraulischem Durchfluss. Bei der Penetration ist zunächst ein linearer Anstieg zu verzeichnen, anschließend ist der Verlauf proportional zu \sqrt{t} . Der Kegelwinkel ist für die gruppierte Lochdüse enger, auch die Schuss-zu-Schuss-Schwankungen fallen im Vergleich zu der Referenzdüse mit gleichem Durchfluss SH171 deutlich geringer aus. Durch die Untersuchungen im Nahbereich zeigt sich, dass Sacklochsprays grundsätzlich breiter und stärker fluktuierend sind als

Sitzlochsprays. Dies bestätigen die Ergebnisse der beiden Referenzdüsen SH121, die jeweils einen dieser Spritzlochtypen abbilden. In optischen Untersuchungen können die beiden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse bis zu einem Abstand von 1,5 mm vom Düsenaustritt unterschieden werden, danach ist das gruppierte Spray optisch nicht von einem konventionellen Spray unterscheidbar.

Unterschiede zwischen gruppierter Lochdüse und Referenzdüse können vor allem mittels Strahlkraftmessungen detektiert werden. Es können zwei individuelle Impulspicks bis zu einem Abstand von ≈ 7 mm vom Düsenaustritt detektiert werden, dies entspricht in etwa der vierfachen Distanz, die mittels optischer Messtechnik festgestellt werden kann. Überraschenderweise sind signifikante Unterschiede in der Impulsverteilung zwischen den beiden Spritzlöchern der gruppierten Lochdüse erkennbar. Der Impuls des Sitzlochsprays ist deutlich ausgeprägter als der des Sacklochsprays. Der maximal erreichte Impuls der gruppierten Düse ist deutlich niedriger als der der Referenzdüse mit gleichem hydraulischen Durchfluss, allerdings ist die Verteilung der gruppierten Lochdüse breiter.

Eine geringe Flüssigkeitsreichweite, die Indikator für eine schnelle Verdampfung und gute Gemischbildung ist, kann durch die gruppierte Lochdüse in gleichem Maße erreicht werden wie durch das Referenzspray mit gleichem hydraulischen Durchfluss. Auch die Fluktuationen in der Flüssigkeitsreichweite liegen für alle betrachteten Sprays relativ im gleichen Bereich. Ein Aufschaukeln der Fluktuationen durch die gruppierten Spritzlöcher wird nicht beobachtet. Das sprayinduzierte Airentrainment erreicht im Nahbereich der Düsen für alle betrachteten Betriebspunkte Geschwindigkeiten im Bereich von 2 – 6 m/s. Nur im Nahbereich kann ein leichter Anstieg der Gasgeschwindigkeit für die gruppierte Lochdüse erkannt werden und zwar dort, wo die beiden Sprays optisch noch unterscheidbar sind. Beide Untersuchungen zeigen, dass die Gemischbildung des gruppierten Sprays dem eines konventionellen Sprays mit gleichem hydraulischem Durchfluss gleicht.

Das betrachtete Zerstäubungskonzept der interagierenden Sprays birgt weniger Potentiale als erhofft. Die These, dass die Penetration der eines Referenzsprays mit gleichem hydraulischem Durchfluss entspricht, kann bestätigt werden. Die Hoffnung wäre gewesen, dass die Flüssigkeitsreichweite der der Düse SH171 entspricht, das Entrainment dem doppelten der Düse SH121. Bei Betrachtung des Impulsbilanz kann dies jedoch nicht erwartet werden. Eine bessere Gemischbildung durch die gruppiert angeordneten kleineren Löcher zeigt sich jedoch nicht. Sowohl die Flüssigkeitsreichweite als auch das Entrainment stimmen mit denen der Referenzdüse mit gleichem hydraulischen Durchfluss überein. Vorteilhaft sind die geringeren Schuss-zu-Schuss-Schwankungen und das somit stabilere Spray der gruppierten Lochdüse. Die Untersuchungen fanden mit Dreilochdüsen statt, weswegen die Stabilität der Sprays aufgrund von höheren Querströmungsanteilen gegenüber Seriendüsen mit 5-8 Lochpaaren eher kleiner ist. Sollte sich die gesteigerte Stabilität und das schmalere Spray auch bei einer konventionellen Anzahl an Düsenlöchern bestätigen, so birgt die gruppierte Lochdüse das Potential, stabilere Sprays zu erzeugen. Die unterschiedliche Aufteilung des Sprays in Sitz- und Sacklochanteil kann genutzt werden, um gezielt Effekte der Massenverteilung zu beeinflussen. Durch die Verwendung von gruppierten Düsen entstehen somit Freiheitsgrade für die Auslegung von Sprays.

Mit den verwendeten Messtechniken konnte ein Gesamtüberblick zur Interaktion der beiden Einzelsprays erlangt werden. Die optischen Messtechniken wurden mit der intrusiven Strahlkraftmesstechnik ergänzt, sodass ein kompletter Einblick zum physikalischen Verständnis der Zerstäubung, Verdampfung und Gemischbildung interagierender Dieselsprays gewonnen werden konnte. Eine Messtechnik alleine kann die komplexen Sachverhalte der Gemischbildung nur ansatzweise beleuchten. Durch die Kombination mehrerer Messtechniken kann ein umfangreicher

Einblick in die Interaktion zweier Dieselsprays gegeben und ein Vergleich zu konventionellen Referenzdüsen gezogen werden.

Durch die hohe optische Dichte des Dieselsprays sind der optischen Messtechnik Grenzen gesetzt. Durch optische Messverfahren Größen wie die Tröpfchengeschwindigkeit- und -größe im Dieselspray direkt zu ermitteln, ist daher im Nahbereich schwierig. Mittels optischer Techniken werden vor allem Informationen gewonnen, die aus der Sprayform- und Bewegung der Sprayspitze abgeleitet werden können. Die Untersuchungen wurden sowohl bei Umgebungstemperatur und -dichte als auch bei motorähnlichen Bedingungen durchgeführt. Die Auswertung der Brennkammermessungen wird durch Beam-Steering-Effekte, verursacht durch die hohen Temperaturen und Umgebungsdichten, negativ beeinflusst. Gerade bei hoher Vergrößerung ist die Qualität der Bilder, die zur Auswertung nötig ist, nicht immer gegeben.

Um die Innenströmung und die Verteilung auf die einzelnen Spritzlöcher in einer gruppierten Lochdüse nachvollziehen zu können, sind Simulationen der Innenströmung unumgänglich. Des Weiteren konnten die Prozesse bis hin zur Gemischbildung durch die Untersuchungen dargestellt werden. Wie sich das Spray der gruppierten Lochdüse im Motor verhält, muss zusätzlich untersucht werden. Im Übrigen wäre es messtechnisch spannend, Röntgenuntersuchungen der gruppierten Sprays durchzuführen, um eine nochmals höhere Auflösung zu erreichen. Es wird nur die Flüssigkeit abgebildet. Die Messungen können mit denen aus der Strahlkraft abgeglichen werden. Außerdem sind LCV-Messungen zur Bestimmung der Geschwindigkeiten im Nahbereich interessant. Diese sind zwar nur bei reduziertem Gegendruck möglich, können aber vielleicht die Messungen in der Strahlkraft beleuchten. Durch unterschiedliche Geschwindigkeiten, die $\propto v^2$ in den Impuls eingehen, können die Abweichungen zwischen gruppierter Düse und Referenzdüse vielleicht erklärt werden.

Interagierende Sprays II - kollidierende Sprays

Der Aufbau des fünften Kapitel gleicht im Wesentlichen dem des vierten. Das Kapitel beginnt mit einem allgemeinen Überblick zur Motivation und zur Beschreibung der Kollision zweier Flüssigkeitsjets. Es folgt eine Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse zur Kollision der Jets und der Auswirkungen auf das entstehende Kraftstoffspray. Die Erkenntnisse zum Airentrainement wurden im Rahmen einer Masterarbeit [52] gewonnen. Diese und weitere Ergebnisse wurden bereits als Konferenzbeitrag veröffentlicht [43].

5.1 Motivation, Beschreibung, Stand der Forschung

Motivation Um strenge Abgasnormen erfüllen zu können, geht der Trend im Bereich der Benzindirekteinspritzung hin zu immer höheren Einspritzdrücken bis $p_E = 350$ bar (hoher Druck alleine ist ein sehr ineffizienter Zerstäubungsmechanismus), um so eine schnelle Zerstäubung und eine gute und komplette Homogenisierung gewährleisten zu können [24]. Der Anstieg im Einspritzdruck bringt jedoch die Nachteile höherer Kosten, einer höheren Pumpenantriebsleistung und steigender Ansprüche an das Material mit sich. Um dies zu umgehen, sind alternative Zerstäubungskonzepte von Interesse. Ein Mechanismus, der die Zerstäubung bei vergleichsweise niedrigeren Einspritzdrücken verbessern soll, ist die Kollision zweier identischer zylindrischer Jets in einer Ebene sehr nahe am Düsenaustritt [29, 46]. Durch die Kollision soll die Zerstäubung auf kürzerer Strecke und mit kleineren resultierenden Tröpfchen ablaufen.

Die Zerstäubung von Flüssigkeit durch die Kollision zweier Jets ist als eine effiziente Methode bekannt [21], Injektoren dieses Typs werden in Raketentriebwerken verwendet. Durch die Nutzung der Prallzerstäubung, und nicht ausschließlich der Zerstäubung durch höheren Einspritzdruck, gewinnt die Spraybildung an Freiheitsgraden. Über den Kollisionswinkel zwischen den beiden Jets kann die Ausbreitung im Raum gesteuert werden. Dies ist ein entscheidender Faktor für eine gute und schnelle Gemischbildung und somit für eine emissionsarme und effiziente Verbrennung. Durch die Kollision wird der Impuls in Bewegungsrichtung des Sprays verringert, die Penetration, die Sprayform und der Kegelwinkel des Sprays verändern sich. Konventionelle Zerstäubungskonzepte hingegen beruhen vor allem bei der Dieseleinspritzung alleine auf dem Zerfall zylindrischer Einspritzstrahlen, ausgehend von einem Aufbruch am Rand des Sprays (vgl. Grundlagen - Zerstäubungskonzepte) für die neueren Hochdruckeinspritzventile. Es gibt jedoch auch Hochdruckeinspritzventile die einen Hohlkegel, den Lamellenzerfall oder die Druck-Drallzerstäubung nutzen.

Beschreibung Der Aufprall und die Durchmischung der beiden Flüssigkeitsströmungen destabilisiert diese, sodass kleine Tröpfchen entstehen [21]. Im laminaren Bereich wird durch die Kollision zweier Strahlen eine blatt- oder ellipsenförmige Struktur produziert, die orthogonal zur Kollisionsebene der beiden Strahlen orientiert ist. Dieses Blatt ist instabil und zerfällt in Ligamente, die dann in Tröpfchen zerfallen. Das Schema der Kollision zweier Sprays wurde bereits in Abschnitt 2.6.2 dargestellt.

Durch die Kollision, die örtlich sehr nahe am Düsenaustritt stattfindet, wird gewährleistet, dass die kollidierenden Strahlen eine größere Oberfläche durch die Lamelle entstehen lassen, als dies bei einer Zylinderoberfläche durch Druckzerstäubung möglich ist, und noch nicht durch die Widerstandskraft der umgebenden Luft aufgebrochen sind. Solange der Jet intakt ist, kommt es zu einer Kollision zweier stabiler Flüssigkeiten. Für höhere Re -Zahlen und größere Abstände von der Düsen Spitze wird davon ausgegangen, dass stattdessen zwei bereits teilweise entwickelte Sprays miteinander kollidieren. Dies entspricht für die Kollision dem Übergang vom zweiten windinduzierten Regime in das Zerstäubungsregime.

Kollisionswinkel Einer der Parameter mit dem stärksten Einfluss auf den Gesamtprozess der Zerstäubung durch Kollision ist der Kollisionswinkel zwischen den beiden Jets [22]. Der optimale Kollisionswinkel liegt zwischen den beiden Extremen der frontalen Kollision (Kollisionswinkel $\theta = 180^\circ$) und der parallelen Anordnung (Kollisionswinkel $\theta = 0^\circ$), dargestellt in Abbildung 5.1. Die parallele Anordnung der Sprays ist die Grundlage der im vorherigen Kapitel 4 beschriebenen gruppierten Dieselsprays. Hierbei wird auch von einer Interaktion der Sprays anstelle einer Kollision ausgegangen. Bei der vollständigen Kollision wird das Moment in Vorwärtsrichtung vollständig zerstört. Eine zu starke Verringerung des Vorwärtsimpulses durch Kollision sollte vermieden werden, da das Spray sich im Raum ausbreiten und eine Selbstbenetzung der Düsen Spitze verhindert werden soll. Betrachtungen von Durst [29] zeigen, dass bis zu einem Kollisionswinkel von $\theta = 60^\circ$ kein Zurückspritzen in Richtung des Injektors erwartet wird. Bei der Zerstäubung von Kraftstoffsprays muss ein Optimum zwischen Oberflächenvergrößerung des Sprays durch den Aufprall und Nutzung des Impulses für die Vorwärtsbewegung gefunden werden.

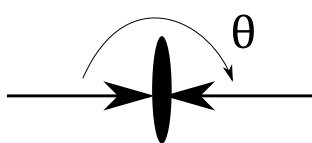


Abbildung 5.1: Mögliche Interaktionsarten von Flüssigkeitsjets. Links die direkte Kollision zweier Jets, rechts die Vereinigung zweier paralleler Jets.

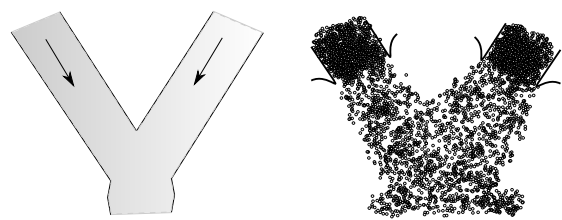


Abbildung 5.2: Kollision eines Sprays abhängig von der Re -Zahl der Jets. Links die Kollision zweier laminarer, nicht aufgebrochener Jets, rechts die Kollision zweier bereits zerstäubter Sprays.

Stand der Forschung Dombrowski und Johns [27] sowie Dombrowski und Hooper [26] waren die ersten, die die Spraybildung durch Kollision zweier laminarer Flüssigkeitsstrahlen untersucht haben. Im Kollisionspunkt dieser beiden sich kreuzenden Flüssigkeitsstrahlen interagieren diese und es folgt eine Lamellenbildung, die dann zum eigentlichen Spray führt. Bisherige Untersuchungen

zur Kollision zweier Flüssigkeitsstrahlen beschränken sich auf den laminaren Bereich. Die intakte Lamelle, die durch den Aufprall der laminaren Jets entsteht, bildet einen dickeren Rand aus [103], der sich destabilisiert und in Ligamente zerwellt, die dann in Tröpfchen zerfallen [27]. Sobald die Jetgeschwindigkeit ausreichend hoch ist, sodass die Zerstäubung direkt am Düsenaustritt beginnt, wird eine schmalere, turbulenter Lamelle um den Kollisionspunkt geformt [27]. Diese Lamelle zerfällt in bogenförmige Ligamente, die sich durch die Oberflächenspannung immer weiter einschnüren und schließlich zu Tröpfchen aufbrechen.

Es wird davon ausgegangen, dass die durch die Kollision entstehenden Tröpfchen einen geringeren SMD aufweisen, da der Zerstäubungsmechanismus einer Flüssigkeitslamelle als wirksamer angesehen wird als der Aufbruch eines Flüssigkeitsstrahls [6]. Unter dieser Annahme kann vorausgesetzt werden, dass mit einem geringeren Druck das gleiche Zerstäubungsergebnis erzielt werden kann wie bei einer konventionellen Referenzdüse mit höherem Einspritzdruck. Der Einfluss des Spritzbildes des Sprays auf das lokale Kraftstoff-Luftgemisch und somit auf die Verbrennung und die Schadstoffemissionen ist für konventionelle Düsen fundiert. Durch die Kollision zweier Sprays im Nahbereich der Düse können zusätzliche Freiheitsgrade für das Düsendesign genutzt werden. Um die Eignung der Twinjetsprays zu bewerten und die Injektoren optimieren zu können, ist ein detailliertes Verständnis des Mechanismus essentiell.

5.2 Durchfluss der Düsen

Die eingespritzte Masse an Kraftstoff wird sowohl für die Twinjetdüsen als auch für die Referenzdüse für unterschiedlich lange Ansteuerzeiten aufgenommen. Abbildung 5.3 zeigt die eingespritzte Menge über der Ansteuerzeit aufgetragen für zwei verschiedenen Einspritzdrücke von $p_E = 50$ bar und $p_E = 100$ bar. Für die Twinjetdüse liegt die eingespritzte Menge für alle Düsen im gleichen Bereich. Pro Ansteuerzeitpunkt ist die Menge in etwa doppelt so groß wie für die Referenzdüse. In beiden Diagrammen ist neben der gemessenen eingespritzten Menge der Referenzdüse auch die mit dem Faktor 2 skalierte eingespritzte Menge der Referenzdüse dargestellt, die zum Vergleich mit den Twinjetdüsen herangezogen wird, da die Referenzdüse nur die Hälfte der Spritzlöcher mit dem gleichen Durchmesser enthält.

Ab einer Ansteuerzeit von 0,5 ms stellt sich der erwartete lineare Verlauf der eingespritzten Menge über die Ansteuerzeit ein. Vorher sind die eingespritzten Mengen zu gering, um ein vollständiges Nadelöffnen und -schließen zu induzieren. Die Nadel befindet sich im ballistischen Bereich. Die Menge, die von den Twinjetdüsen eingespritzt wird, liegt in der gesamten betrachteten Ansteuerzeit leicht unter den skalierten Werten der Referenzdüse und zeigt für alle Düsen einen linearen Verlauf. Bei sehr geringen Ansteuerzeiten zeigen sich im nicht-linearen Verlauf starke Peaks. Dies liegt auch daran, dass Nadel und Anker noch in Bewegung sind. Der Zusammenhang zwischen Einspritzdauer und Bestromungsdauer ist daher sehr komplex. Dieser kommt vermutlich von einer Druckwelle, die in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gut zu sehen ist und für alle Injektoren unabhängig vom Düsentyp auftritt. Die Druckwelle geht knapp 0,3 ms nach Einspritzbeginn durch das Spray, unabhängig von Einspritzdruck und betrachteter Düse.

Da es sich bei den Düsen um erste Muster handelt, die fertigungstechnisch nicht ausgereift sind, kann es bei der Einspritzung zu Nachtropfen und zur Benetzung der Düsenkuppe kommen. Zur Untersuchung der grundlegenden physikalischen Eigenschaften der Twinjetsprays ist dieses Verhalten der Düsen jedoch nicht weiter störend. Die verwendeten Düsen sind bereits im Abschnitt 3.1.2 dargestellt.

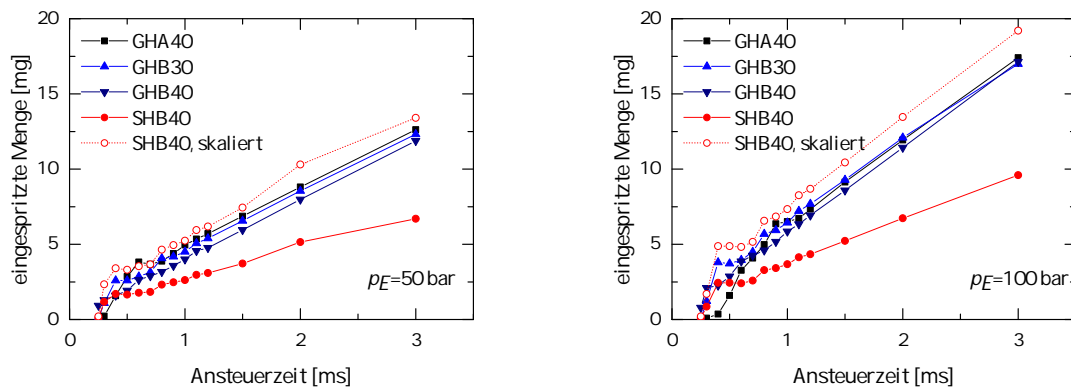


Abbildung 5.3: Darstellung der eingespritzten Menge für verschiedene Ansteuerzeiten für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar links und für $p_E = 100$ bar rechts. Die eingespritzte Menge der Referenzdüse SHB40 ist sowohl im Original als auch mit Faktor 2 multipliziert dargestellt, um die theoretischen Massenströme gleichzustellen. Die Düsenparameter können Tabelle 5.1 entnommen werden.

Düse	gem. Einspritzrate [mg/ms]	Stdabw. [mg/ms]	Durchflussbeiwert c_D
GHA40	5,33	0,11	0,55
GHB30	5,61	0,16	0,58
GHB40	5,65	0,03	0,59
SHB40	2,97	0,06	0,62

Tabelle 5.1: Gemittelte Einspritzrate mit Standardabweichung und berechneter Durchflussbeiwert c_D über einen Zeitbereich von 0,5 – 3 ms für die verschiedenen Düsen für einen Einspritzdruck von $p_E = 100$ bar. Mittelung aus 1000 Einspritzungen pro Zeitpunkt.

Tabelle 5.1 zeigt die über den Ansteuerzeitbereich von 0,5 – 3 ms gemittelte Einspritzrate mit Standardabweichung sowie den für diesen Bereich ermittelten Durchflussbeiwert c_D (vgl. Abschnitt 2.1). Der Durchflussbeiwert, der den Wirkungsgrad des Düsenlochs darstellt, liegt für die hier betrachteten Düsen im Bereich von 0,6. Für die Referenzdüse ist der Wert am höchsten, für die Twinjetdüse GHA40, bei der die Düsenlöcher alle auf einem Umkreis liegen, am niedrigsten. Die Durchflussbeiwerte der Typ-B Düsen liegen dazwischen. Für die gemittelte Einspritzrate zeigt sich, dass die eingespritzte Menge der Twinjetdüsen nicht ganz der erwarteten doppelten Menge entspricht, sondern 5 – 11 % darunterliegt.

Die Werte des Durchflussbeiwertes liegen für direkt einspritzende Benzininjektoren bei deutlich geringeren Werten als für Dieselinjektoren (vgl. Kapitel 4.2). Der Kraftstoff nimmt einen geringen Teil des Querschnitts tatsächlich ein. Für konventionelle Sprays liegen die Durchflussbeiwerte bei ungefähr 0,5 – 0,6. Der Durchflussbeiwert der Twinjetdüsen liegt bei Benzinisprays somit im erwarteten Bereich. Die verwendeten Versuchsdüsen wurden im Vergleich zu konventionellen Düsen ohne Vorstufe gefertigt (vgl. Abschnitt 3.1.2).

5.3 Geometrische Charakterisierung

Hochgeschwindigkeits- und hochauflösende Aufnahmen können verwendet werden, um Sprays zunächst zu charakterisieren. Hierbei werden die für die Spraycharakterisierung typischen Größen ermittelt: Penetration und Kegelwinkel (vgl. Kapitel 4.3). Durch die beiden Größen wird die Ausbreitung des Sprays im Raum abgebildet. Um Wandbenetzung zu vermeiden, ist eine geringe Penetration von Vorteil. Bei Verwendung des herkömmlichen Konzepts ist dies mit einer Reduktion des Einspritzdrucks möglich, die jedoch zu einer nachteiligen Zerstäubung führen kann. Durch das Konzept der Prall- statt der Druckzerstäubung kann dieser Nachteil umgangen werden. Sowohl Benzin- als auch Dieseldüsen beschleunigen den Kraftstoff auf die Bernoulligeschwindigkeit [93].

Die vier in dieser Arbeit betrachteten Sprays sind in Abbildung 5.4 zu sehen. Die Schattenaufnahmen der vier betrachteten Sprays zeigen von links nach rechts zunächst die drei Twinjetsprays und anschließend das Referenzspray. Auffällig ist, dass die Twinjetsprays sich räumlich weiter ausdehnen. Auf der linken Sprayseite ist ein Einzelspray in der Bildebene aufgenommen. Auf der rechten Sprayseite überlappen sich die beiden anderen Sprays der Dreilochdüse. Strukturen des Sprays sind somit auf der linken Seite deutlich besser zu identifizieren. Die Penetration der Twinjetsprays ist geringer, obwohl die für die Twinjetsprays doppelt so große eingespritzte Menge beachtet werden muss.

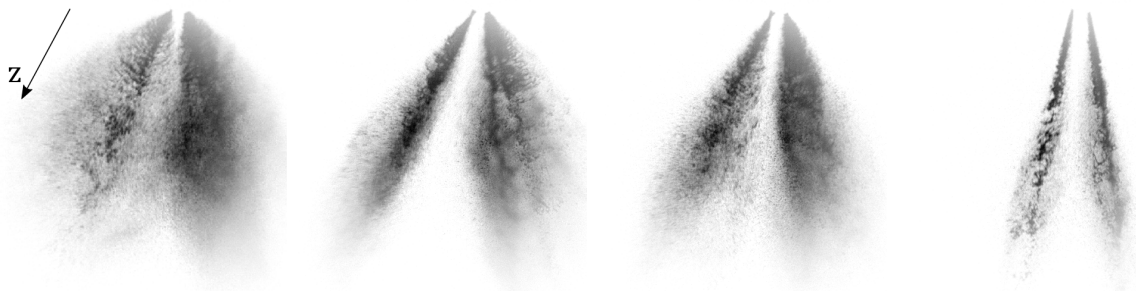


Abbildung 5.4: Invertierte Schattenaufnahmen der vier betrachteten Sprays (von links nach rechts GHA40, GHB30, GHB40 und SHB40) zum Zeitpunkt $t_{ASOE} = 0,63$ ms. Auf der linken Sprayseite ist je ein einzelnes Spray(-paar) dargestellt, rechts überlappen sich die beiden anderen Sprays(-paare). Umgebungsbedingungen, Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, Ausschnitt $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, die Bewegungsrichtung des Einzelsprays entspricht der z -Achse.

Bei Betrachtung des Nahbereichs des Sprays, dargestellt in Abbildung 5.5, sind die Spraystrukturen differenziert erkennbar. Durch diese Aufnahmen ist eine Klassifizierung des dominanten Aufbruchs und der Zerstäubungsmechanismen möglich. Der Kollisionspunkt der beiden Jets befindet sich sehr düsenah bei $z = 100\text{ }\mu\text{m}$ vom Düsenaustritt, ein Zurückspritzen von Tröpfchen in Richtung der Injektorspitze ist trotz des geringen Abstands nicht erkennbar. Ein direkter Vergleich zwischen Typ A und Typ B Sprays ist schwierig, da auch die Bohrungen und somit die Anströmung im Injektor unterschiedlich sind und daher nicht sicher davon ausgegangen werden kann, dass das Typ A Spray dem um 90° gedrehten Typ B Spray entspricht. Bei der Aufnahme von Typ A Sprays, bei dem die Spritzlöcher alle auf einem Umkreis liegen, ist die Lamelle, die sich durch die Kollision der beiden Jets parallel zur Bildebene ausbildet, sichtbar (Abbildung 5.5 oben). Ligamentstrukturen, die für niedrigere Einspritzdrücke ausgeprägter und deutlich erkennbar sind, bilden sich in kurzen Abstand nach dem Kollisionspunkt. Ligamente lösen sich in kürzestem Abstand von der Hauptlamelle ab. Das Vorhandensein optisch dichter, kleiner Tröpfchen nimmt

mit steigendem Einspritzdruck zu, sodass für die hohen Drücke keine Strukturen mehr erkannt werden können.

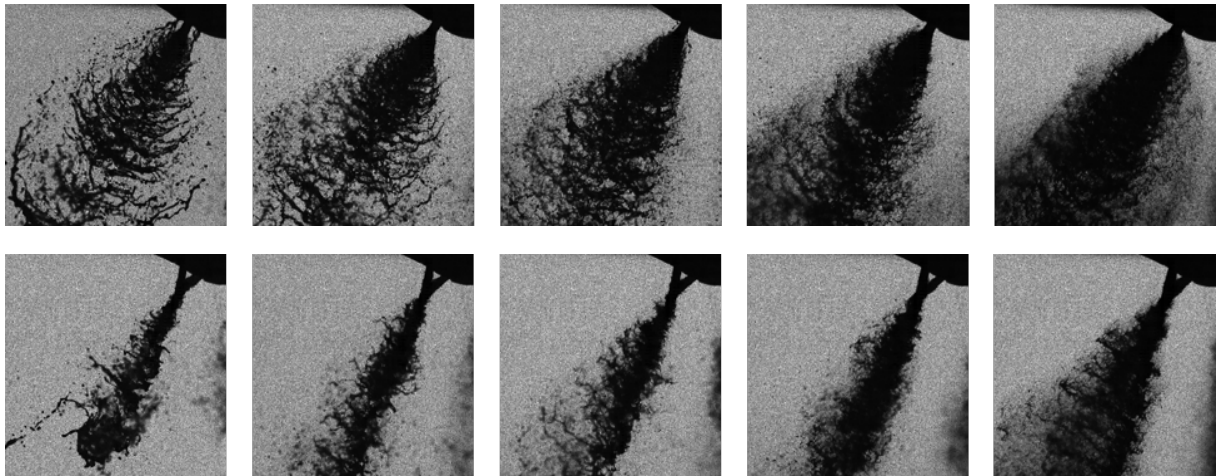


Abbildung 5.5: Schattenaufnahmen des Twinjetsprays GHA40 oben und GHB40 unten $t_{\text{ASOE}} = 0,55 \text{ ms}$ nach Ansteuerbeginn. Umgebungsbedingungen, ansteigender Einspritzdruck von links nach rechts ($p_E = 10, 20, 30, 50, 100 \text{ bar}$, Bildausschnitt $3,2 \text{ mm} \times 3,2 \text{ mm}$).

Der Innenbereich der entstehenden Lamelle ist nicht mehr laminar, sondern turbulent. Direkt ab dem Kollisionspunkt bilden sich Ligamente und Tröpfchen, die sich in Hauptrichtung des Sprays mitbewegen, was in Abbildung 5.6 vor allem für GHA40 gut zu erkennen ist. Ein voll entwickelter Aufbruch der Flüssigkeit, wie von Bailardi *et al.* [12] dargestellt (vgl. Abschnitt 2.4.2), findet statt. Bei hohen Einspritzdrücken scheint es einen direkten Zerfall der Flüssigkeit in Tröpfchen zu geben, ohne dass sich Ligamente als Zwischenstufe ausbilden. Die Tröpfchen bewegen sich in bogenförmigen Tröpfchenwolken weiter. Für die niedrigeren Einspritzdrücke ($p_E \leq 50 \text{ bar}$) hingegen scheinen bei der Kollision Ligamente zu entstehen. Wellenförmige Strukturen formen sich direkt am Kollisionspunkt der beiden Jets. Die Größe der Lamelle nimmt im Vergleich zu laminaren Lamellen ab, der Ausbreitungswinkel der Tröpfchen ebenfalls.

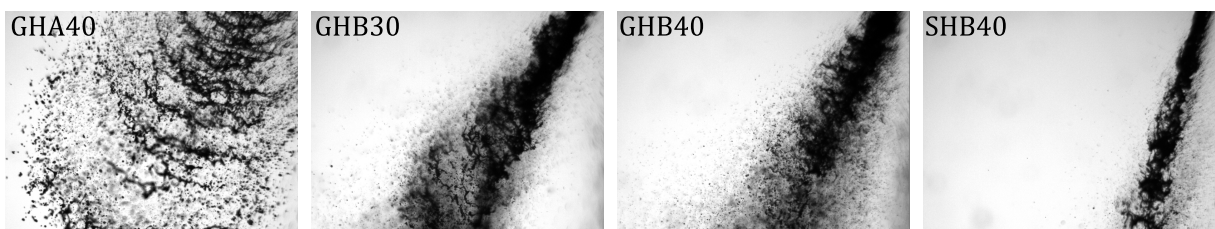


Abbildung 5.6: Detaillierte Schattenaufnahmen aller vier betrachteter Sprays $t_{\text{ASOE}} = 0,8 \text{ ms}$ nach Ansteuerbeginn. Umgebungsbedingungen, Einspritzdruck $p_E = 50 \text{ bar}$. Bildausschnitt $1,8 \text{ mm} \times 2,3 \text{ mm}$.

Typ B Sprays, dargestellt in Abbildung 5.5 unten, können durch die Abbildung des Kollisionspunkts und der beiden einzelnen Jets charakterisiert werden. Durch den geringen Weg zum Kollisionspunkt ist es schwierig, die einzelnen Strahlen vor der Kollision zu charakterisieren. Das Blatt steht senkrecht zur Bildebene und ist mit der schmalen Seite sichtbar, es sind Ligamente und Tröpfchen erkennbar, die sich seitlich aus dem Blatt herausbewegen. Für höhere Einspritzdrücke steigt die scheinbare Dicke des Blattes signifikant an, diese ist größer als die Tiefe einer laminaren Lamelle. In den Detailaufnahmen der Typ B Sprays (Abbildung 5.6, beide mittleren Aufnahmen) umgibt

ein feiner Tröpfchennebel die ligamentöse Lamelle, der sprayabwärts breiter wird. Im Vergleich zu dem Referenzspray (Abbildung 5.6 rechts) sind die Typ B Sprays breiter und es sind schon wesentlich mehr umgebende Tröpfchen vorhanden.

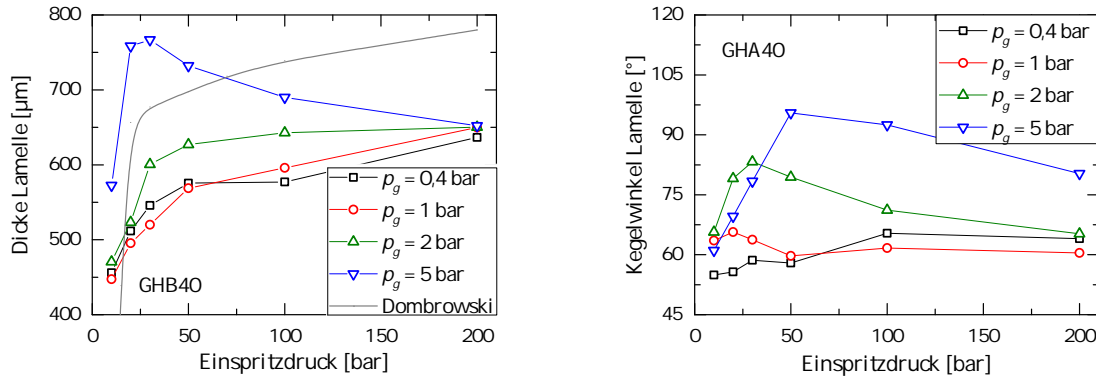


Abbildung 5.7: Lamellendicke des Twinjetsprays GHB40 und Kegelwinkel der Lamelle für GHA40 für verschiedene Einspritz- und Umgebungsdrücke. Bildung der Werte aus Mittelwerten aus fünf Sequenzen.

Die Lamellendicke, die aus Aufnahmen des Injektors Typ B (GHB40) gewonnen und der Kegelwinkel der Lamelle, der durch Auswertung der Aufnahmen von Injektor Typ A (GHA40) dargestellt werden kann, sind in den Diagrammen der Abbildung 5.7 gezeigt. Die beiden Größen sind, wie bereits in Abschnitt 4.3 dargestellt, mittels Binarisierung ausgewertet. Die Dicke der Lamelle (Abbildung 5.7 links) steigt mit dem Einspritzdruck an, wobei sich das Spray kegelförmig vom Kollisionspunkt sprayabwärts aufweitet. Die Aufweitung des Sprays ist neben dem Einspritzdruck auch vom Gegendruck in der Kammer abhängig: Je größer der Gegendruck in der Kammer, desto breiter die Lamelle. Ein Vergleich der experimentell ermittelten Lamellendicke mit theoretischen Betrachtungen von Dombrowski [27] ist ebenfalls im Diagramm eingezeichnet. Die Werte liegen im gleichen Größenbereich, obwohl die Lamelle bei höheren Einspritzdrücken und somit turbulenten Bedingungen weder homogen noch gleichförmig ist. Die dargestellten Werte sind ein Mittelwert der Breite über die ersten drei Millimeter vom Düsenaustritt sprayabwärts.

Der Kegelwinkel (Abbildung 5.7 rechts) des Sprays bleibt bei Anstieg des Einspritzdrucks und bei Unterdruck sowie atmosphärischem Gegendruck in der Kammer mehr oder weniger auf gleichem Niveau. Für niedrige Einspritzdrücke führen höhere Gegendrücke zunächst zu einer Vergrößerung des Kegelwinkels, der jedoch für hohe Einspritzdrücke wieder abnimmt.

Bei Betrachtung des Sprays der GHA40-Düse fallen die in relativ regelmäßigen Abständen entstehenden Ligamente auf. Die Distanz zwischen zwei einzelnen Ligamenten ist in Abbildung 5.8 (links) in Abhängigkeit vom Einspritzdruck dargestellt. Wie erwartet, wird die Distanz zwischen den Ligamenten von der Düsenspitze in Strömungsrichtung größer. Je weiter sich die Wellen ausbreiten, desto größer sind die Abstände dazwischen. Der Anstieg im Einspritzdruck bewirkt eine minimale Abnahme der Entfernung zwischen den Ligamenten. Die Verläufe des Abstands für die einzelnen Einspritzdrücke gleichen sich.

Wie in Abbildung 5.8 rechts dargestellt ist, ist ein typischer Durchmesser der Ligamente des Sprays GHA40 für einen Einspritzdruck von $p_E = 10$ bar in der Größenordnung von $80 \mu\text{m}$. Bei höheren Einspritzdrücken ist zunächst eine leichte Abnahme und anschließend ein leichter Anstieg

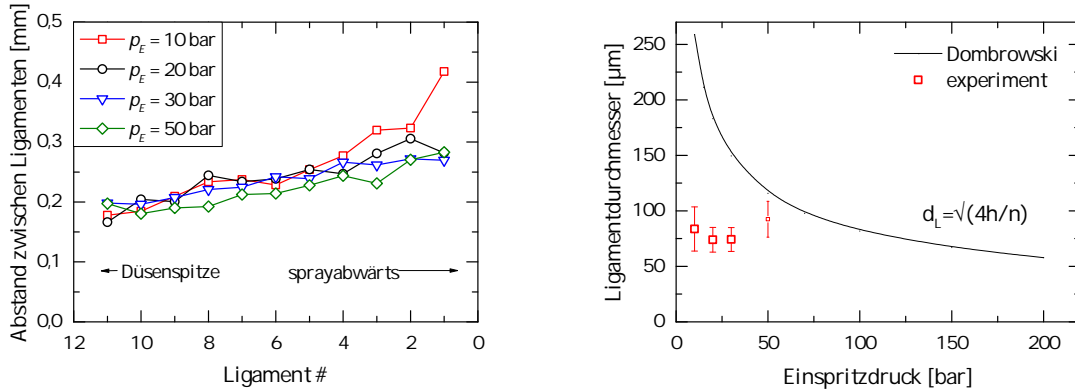


Abbildung 5.8: Charakterisierung der beim Twinjetspray GHA40 sichtbaren Ligamente. Abstand zwischen den entstehenden Ligamenten links, Ligamentdurchmesser für verschiedene Einspritzdrücke auf der rechten Seite. Umgebungsbedingungen, Bildung der Werte aus Mittelwerten aus fünf Sequenzen.

des Durchmessers zu verzeichnen. Für die ganz hohen Einspritzdrücke ($p_E > 50 \text{ bar}$) können in den Aufnahmen keine Ligamente mehr identifiziert werden. Beim Vergleich der experimentell bestimmten Durchmesser zu den theoretischen Untersuchungen zu laminaren Lamellen von Dombrowski & Johns [27] bewegt sich der Ligamentdurchmesser im gleichen Bereich. Die experimentell bestimmten Durchmesser scheinen aber unabhängig vom Einspritzdruck zu sein. Der Durchmesser der resultierenden zylindrischen Ligamente kann durch eine Massenbilanz zwischen der Dicke der Lamelle h am Aufbruchpunkt und der Wellenzahl n nach $d_L = \sqrt{4h/n}$ bestimmt werden.

5.4 Spraygeschwindigkeit

Da die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen flüssigem Kraftstoff und umgebender Gasatmosphäre der dominante zerfallsfördernde Parameter ist, sind Geschwindigkeitsmessungen innerhalb und außerhalb des Sprays von Interesse. Der Einfluss des Aufpralls und die Umlenkung des Sprayimpulses können im Nahbereich beobachtet werden. Hochauflösende Schattenaufnahmen ermöglichen das Verfolgen von Tröpfchen, um die Geschwindigkeit des Sprays im Nahbereich der Düse und den Einfluss der Kollision auf die Geschwindigkeit abzubilden. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Bildern des Bildpaares ist sehr kurz ($\delta t = 1 \mu\text{s}$), um die hohen Geschwindigkeiten des Sprays bis zu 200 m/s auflösen zu können. Die Geschwindigkeit des Sprays, die mittels SPIV im Nahbereich der Düse bestimmt wird, ist in Abbildung 5.9 visualisiert. Die Schattenaufnahmen haben genug Kontrast und enthalten sowohl quantitativ als auch qualitativ ausreichend Strukturen für die SPIV Auswertung [108], daher kann von plausiblen Resultaten ausgegangen werden. In manchen Regionen, vor allem am düsen nahen Kollisionspunkt, ist die optische Dichte des Sprays zu hoch, es können keine Strukturen identifiziert und somit verfolgt werden. Ein wichtiger Unterschied zum konventionellen PIV ist, dass bei SPIV integrale Aufnahmen entlang einer Linie verwendet werden, um 2D-PIV anzuwenden. Eine Information über die Position der Struktur entlang der optischen Achse ist nicht vorhanden. Die Doppelbilder werden mittels konventionellem PIV-Algorithmus ausgewertet, der auf die Spraytröpfchen angewandt wird.

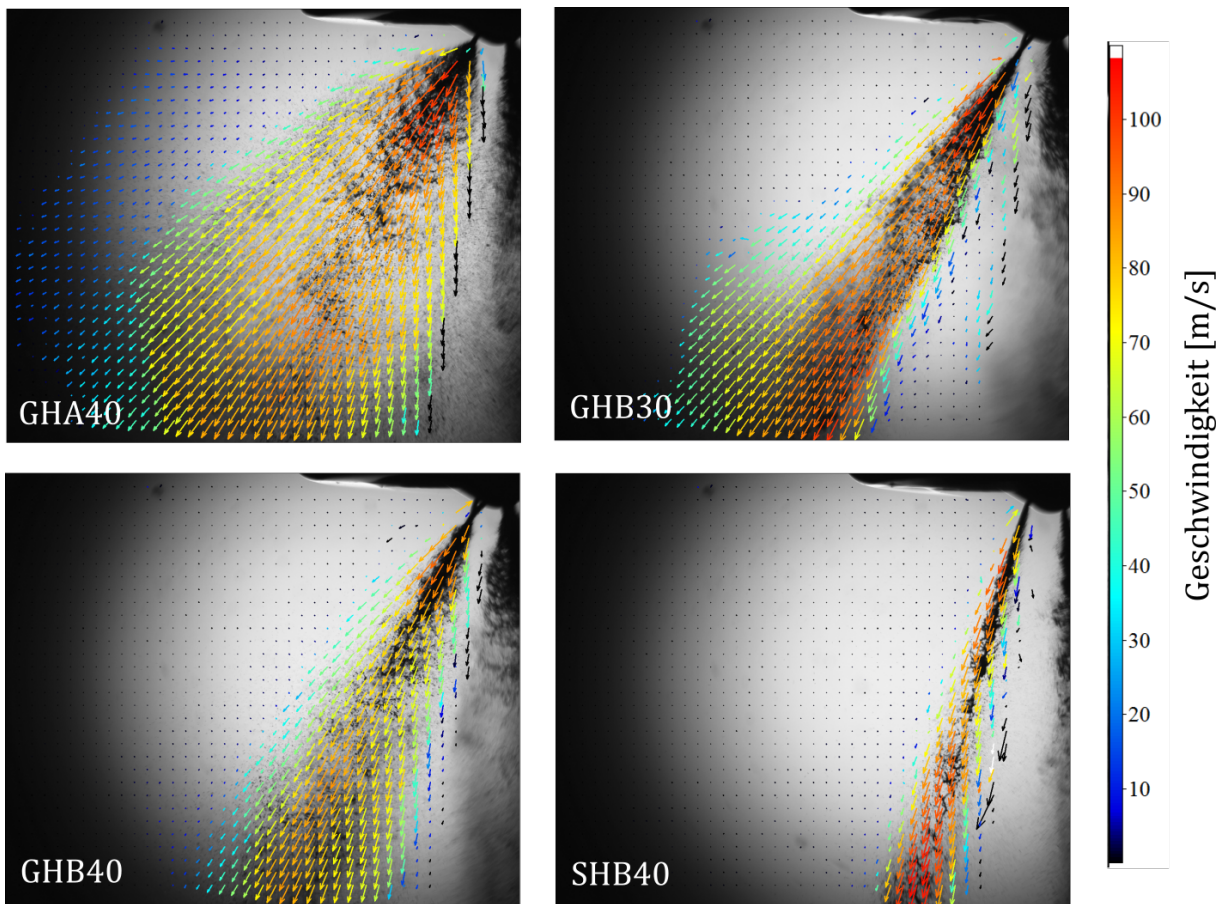


Abbildung 5.9: Geschwindigkeitsfelder aller vier Sprays für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, $t_{ASOI} = 1$ ms, Ausschnitt $14,8 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$, Geschwindigkeit ermittelt aus 100 Bildpaaren

Die Ausbreitung der Einzelsprays ist auf den hochauflösenden Aufnahmen gut erkennbar. Spray GHA40 hat den breitesten Kegelwinkel in der Bildebene, die Referenzdüse SHB40 den schmalsten. Die höchsten Geschwindigkeiten im Spray treten kurz nach dem Kollisionspunkt auf, stromabwärts und radial nach außen nehmen die Geschwindigkeiten ab. Die Geschwindigkeitsfelder sind symmetrisch zur Sprayachse verteilt. Das Referenzspray weist auch in größerem Abstand zur Düse ($z = 10 \text{ mm}$) noch höhere Geschwindigkeiten auf. Bei den Twinjetsprays, vor allem bei denen mit größerem Kollisionswinkel ($\theta = 40^\circ$), nimmt die Geschwindigkeit entlang der Sprayachse deutlich schneller ab. Durch die Kollision wird der Impuls in Vorwärtsrichtung verringert, was sich direkt auf die Geschwindigkeit auswirkt.

In Abbildung 5.10 sind Spraygeschwindigkeiten – gemessen in einem Abstand von $z = 5 \text{ mm}$ vom Düsenaustritt – abgebildet. Zusätzlich ist die theoretische, maximale Bernoulli-Geschwindigkeit mit und ohne dem aufgrund der Impulserhaltung erwarteten Kollisionsfaktor $\cos(\theta/2)$ dargestellt. Der Verlauf der experimentell ermittelten Kurven passt gut zu der erwarteten Bernoullikurve, liegt aber leicht darunter. Die ermittelte Geschwindigkeit ist für alle untersuchten Einspritzdrücke für das Referenzspray SHB40 am höchsten. Durch die Kollision verlieren die Twinjetsprays an Impuls in Bewegungsrichtung. Die Abhängigkeit vom Kollisionswinkel ist nur teilweise zu erkennen. Die kollidierenden Twinjetsprays weisen niedrigere Geschwindigkeiten als das Referenzspray auf. Die erwartete Abhängigkeit, dass mit dem größeren Kollisionswinkel von $\theta = 40^\circ$ das Spray

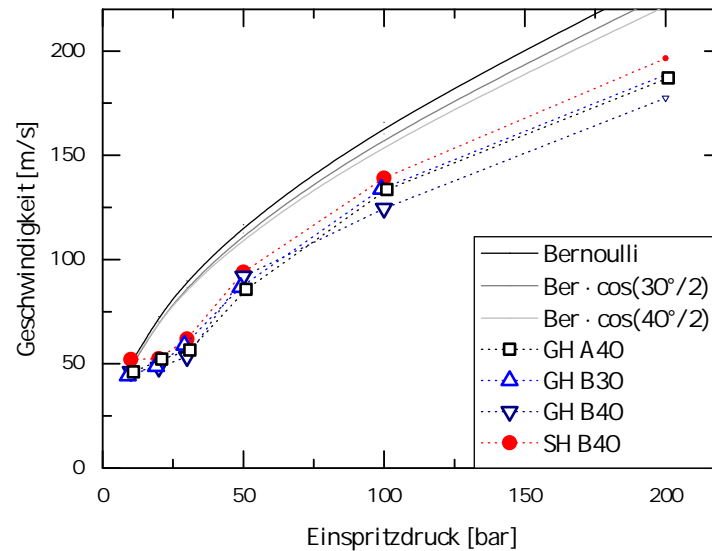


Abbildung 5.10: Darstellung der ermittelten Geschwindigkeiten in einem Abstand von $z = 5$ mm von der Düsen Spitze, gemessen entlang der Sprayachse für alle vier Sprays

auch um 3 % stärker abgebremst wird, kann nicht bestätigt werden. Durch die Betrachtung der Spraygeschwindigkeiten an einem sehr düsen nahen Punkt kann jedoch nicht das ganze Spray abgebildet werden.

Je höher die Einspritzdrücke, desto optisch dichter wird das Spray, die Anzahl eindeutig identifizierbarer Strukturen wird geringer. Für die hohen Einspritzdrücke kann eine Auswertung nur noch zum Teil erfolgen. Bei einem Einspritzdruck von $p_E = 200$ bar ist sie nur noch für Typ GHA40 möglich, da das Spray durch den großen Kegelwinkel für die Auswertung weit verteilt ist und sich ausreichend Strukturen für SPIV finden lassen. Für die geringen Einspritzdrücke $p_E \leq 20$ bar liegen die Geschwindigkeiten näher an Bernoulli, wobei gerade bei einem Einspritzdruck von $p_E = 10$ bar von Unsicherheiten bei der Einstellung des Einspritzdrucks ausgegangen werden muss. Zudem ist die geringe räumliche Auflösung ein weiterer Punkt. Bei Geschwindigkeiten von 50 m/s ist die Verschiebung $\approx 50 \mu\text{m} \approx 3$ Pixel.

5.5 Verdampfungsverhalten

Zur Erreichung einer effizienten und emissionsarmen Verbrennung ist eine gute räumliche Verteilung des Sprays im Brennraum essentiell. Um das Verdampfungsverhalten der durch Kollision entstehenden Twinjetsprays zu betrachten, werden die Sprays bei erhöhtem Umgebungsdruck und erhöhter Umgebungstemperatur untersucht. Die gewonnenen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen werden mittels Hintergrundsubtraktion und anschließender Binarisierung ausgewertet, wie auch für die Dieselsprays im vorherigen Kapitel 4.4 angewandt. Anschließend wird aus den binarisierten Bildern die Flüssigkeitsreichweite, der Kegelwinkel sowie die Verdampfungsdauer bestimmt.

Abbildung 5.11 zeigt Schattenaufnahmen der Sprays bei $t_{ASOI} = 125 \mu\text{s}$ und einer Temperatur von $T = 500$ K. Näher an der Düse sind die Sprays optisch dichter, was auf einen höheren Anteil

an Flüssigkeit hinweist. An der Sprayspitze ist das Spray bereits zum Großteil verdampft. Die ligamentförmige Struktur ist noch vorhanden, jedoch besteht diese aus einem feinen Tröpfchennebel anstatt aus einer intakten Flüssigkeit, wie in Abbildung 5.12 erkennbar ist. Die Aufweitung des Sprays wird im Vergleich zu Messungen bei Raumtemperatur und -druck geringer, da die Tröpfchen am Rand des Sprays schneller verdampfen. Für die Betrachtung der Sprays unter verdampfenden Bedingungen ist es wichtig, die doppelte eingespritzte Spraymenge (vgl. Abschnitt 5.2) bei den Twinjetsprays zu berücksichtigen. Im Vergleich zu den Aufnahmen bei Umgebungstemperatur und -dichte ist das Spray optisch weniger dicht, die drei einzelnen Spraykeulen können leicht identifiziert werden.

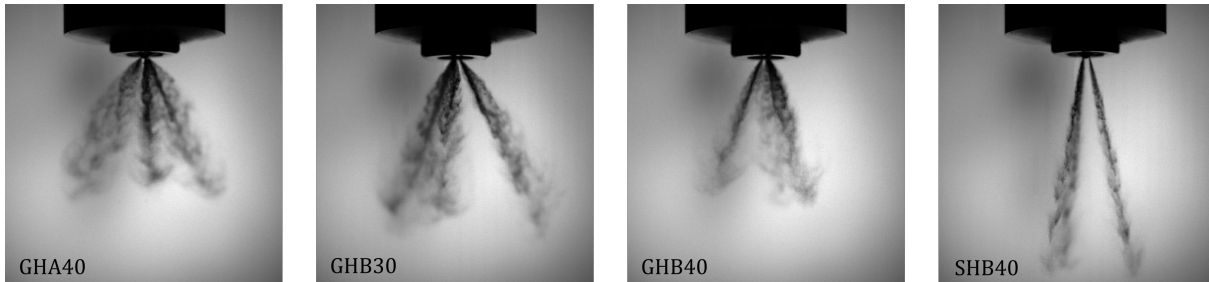


Abbildung 5.11: Schattenaufnahmen des gesamten Sprays der vier verschiedenen Düsen für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, $T_g = 500$ K, $p_G = 5$ bar, $t_{ASOI} = 125$ μ s, Ausschnitt 28,5 mm \times 28,5 mm

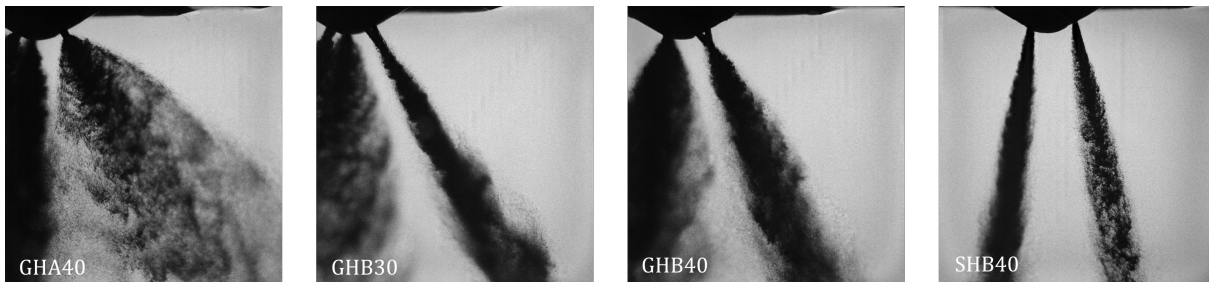


Abbildung 5.12: Schattenaufnahmen einer einzelnen Spraykeule der vier verschiedenen Düsen für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, $T_g = 500$ K, $p_G = 5$ bar, $t_{ASOI} = 125$ μ s, Ausschnitt 7 mm \times 7 mm

5.5.1 Flüssigkeitsreichweite

Die Flüssigkeitsreichweite ist ein wichtiger Charakterisierungsparameter, da die Benetzung im Brennraum mit Flüssigkeit zu einem Wandfilm führen kann. Bei der Verbrennung entstehen durch die daraus resultierende Gemischinhomogenität Partikel. Um diese zu vermeiden, ist eine kurze Flüssigkeitsreichweite essentiell [99]. Die Reichweite der Flüssigkeit ist definiert als Abstand vom Austritt aus der Düse bis zur flüssigen Sprayspitze. Einer kürzeren Flüssigkeitsreichweite geht eine bessere Durchmischung des Sprays mit Luft voraus, somit ist die Flüssigkeitsreichweite auch eine geeignete Kennzahl, um die Gemischbildung zu charakterisieren. Die Flüssigkeitsreichweite ist vom jeweiligen Lochaustritt entlang der Sprayachse gemessen. Bei Benzinsprays ist die Aussagekraft nicht so klar, da hier ein Teil der Verdampfungsenergie aus der Tröpfchentemperatur kommt, was bei Diesel vernachlässigbar ist. Des Weiteren ist eine Einspritzung bei hoher Gastemperatur eher untypisch.

Abbildung 5.13 zeigt die Flüssigkeitsreichweite bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar für zwei verschiedene Umgebungsbedingungen. Die linke Abbildung zeigt die Flüssigkeitsreichweite für die vier Sprays bei einer Temperatur von $T = 400$ K und einem Druck von $p_g = 4$ bar. Die Flüssigkeitsreichweite steigt für alle Sprays zunächst linear, im weiteren Verlauf sinkt die Steigung auf einen wurzelförmigen Verlauf bis zu dem Zeitpunkt ($t = 2,3$ ms), zu dem das Spray verdampft ist. Der lineare Verlauf ist für das Referenzspray am längsten andauernd, für die Düsen mit einem Kollisionswinkel von 40° am kürzesten. Die Flüssigkeitsreichweite des Referenzsprays ist konsequenterweise am höchsten, das Spray erreicht ein Maximum von $z = 20$ mm. Das Twinjetspray GHB30 hat eine geringere Flüssigkeitsreichweite, die geringste Reichweite haben die Sprays GHA40 und GHB40 mit gleich großem Kollisionswinkel, ihre Verläufe stimmen überein. Das Ergebnis deutet einen Einfluss des Kollisionswinkels auf die Flüssigkeitsreichweite an.

Für die extremeren Umgebungsbedingungen ($T_g = 500$ K, $p_g = 5$ bar) zeigt sich der gleiche Trend, dargestellt in Abbildung 5.13 rechts. Der lineare Anstieg zu Beginn ist für alle Sprays kürzer. Auffallend ist zudem, dass die Sprays, wie erwartet, deutlich schneller verdampfen und die maximale Flüssigkeitsreichweite abnimmt. Der Trend der Abhängigkeit vom Kollisionswinkel bestätigt sich in diesen Aufnahmen.

Für einen Einspritzdruck von $p_E = 200$ bar, dargestellt in Abbildung 5.14, steigen die Flüssigkeitsreichweite und auch die Geschwindigkeit, mit der sich das Spray in den Raum bewegt, an. Dies ist dem Anstieg des Einspritzdrucks, dargestellt in der linken Abbildung für eine Temperatur von $T_g = 400$ K und einen Druck von $p_g = 4$ bar, geschuldet. Die Verdampfung des Sprays erfolgt nicht gleichmäßig für alle Bereiche. Dies ist durch den Rückgang der Flüssigkeitsreichweite gegen Ende der Einspritzung sichtbar. An der Spitze ist das Spray bereits verdampft, während im Bauch des Sprays noch Flüssigkeit vorhanden ist. Im Vergleich zum Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar ist die lineare Steigung zu Beginn höher, anschließend verharrt die Flüssigkeitsreichweite auf einem konstanten Niveau, bis sie zum Ende der Einspritzung wieder leicht abnimmt, bevor das gesamte Spray verdampft.

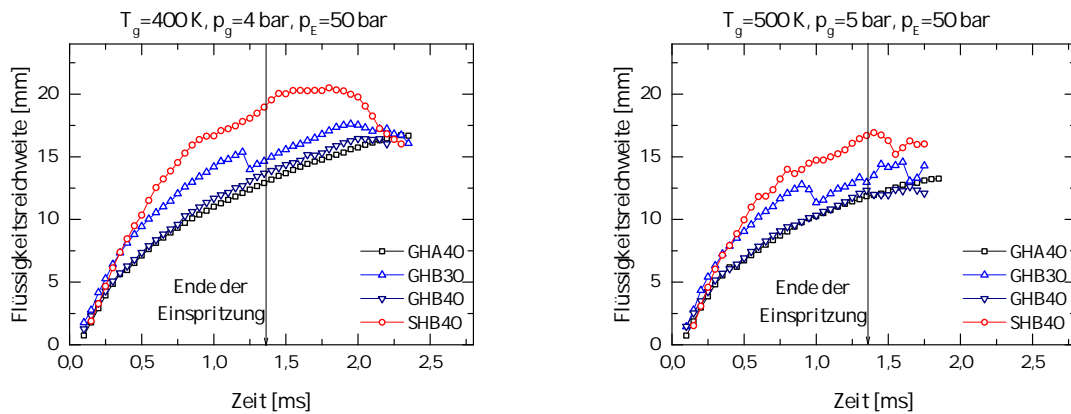


Abbildung 5.13: Flüssigkeitsreichweite für die vier verschiedenen Sprays bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar für $T_g = 400$ K und $p_g = 4$ bar links, für $T_g = 500$ K und $p_g = 5$ bar rechts, Mittelwerte über 100 Einspritzungen

Für die extremeren Umgebungsbedingungen ($T = 500$ K, $p_g = 5$ bar), die in Abbildung 5.14 rechts dargestellt sind, ist die maximale Flüssigkeitsreichweite für höhere Einspritzdrücke auf gleichem Niveau. Die stationäre Reichweite wird zeitlich früher erreicht. Hier scheint sich durch den höheren Druck und die damit bessere Gemischbildung ein Gleichgewicht eingestellt zu haben.

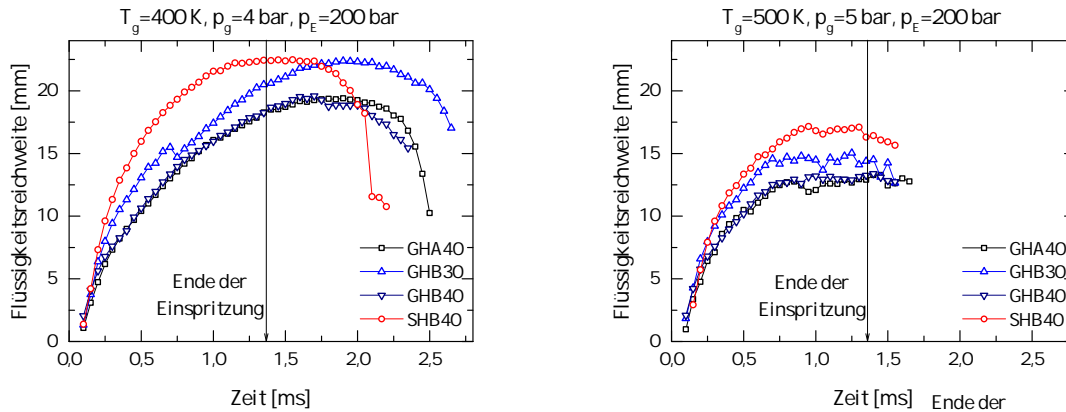


Abbildung 5.14: Flüssigkeitsreichweite für die vier verschiedenen Sprays bei einem Einspritzdruck von $p_E = 200$ bar für $T_g = 400$ K und $p_g = 4$ bar links, für $T_g = 500$ K und $p_g = 5$ bar rechts, Mittelwerte über 100 Einspritzungen

Sowohl die maximale Reichweite als auch die Dauer der Verdampfung entsprechen der bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar. Bei höherem Einspritzdruck wird in der gleichen Zeit mehr Kraftstoff eingespritzt. Nach dem linearen Anstieg der Flüssigkeitsreichweite bleibt diese auf einem stationären Level. Der größere Kollisionswinkel hat auch bei höherem Einspritzdruck den Vorteil einer um 2 mm geringeren Flüssigkeitsreichweite.

Der Kollisionswinkel θ zwischen den Jets beeinflusst die Reichweite der Flüssigkeit. Die Flüssigkeitsreichweite des Twinjetsprays mit geringerem Kollisionswinkel von 30° ist deutlich höher als die des Twinjetsprays mit 40° Kollisionswinkel. Die beiden Twinjetsprays mit einem Kollisionswinkel von 40° zwischen den Jets, GHA40 und GHB40, weisen sowohl für unterschiedliche Einspritzdrücke als auch für unterschiedliche Umgebungsbedingungen ein sehr ähnliches Penetrations- und Verdampfungsverhalten auf.

5.5.2 Kegelwinkel

Durch Reichweite und Kegelwinkel werden Sprays für die Auslegung im Motor beschrieben. Der Gesamtkegelwinkel, veranschaulicht in Abbildung 5.15, ist für Twinjetsprays deutlich größer als für das Referenzspray. Für Typ A Düsen entsteht in der betrachteten Perspektive das Spray mit dem größten Gesamtkegelwinkel. Bei diesem Düsentyp ist die Lamelle, durch die Kollision der beiden Jets entsteht, in der Bildebene sichtbar. Typ B Sprays haben einen um 20° kleineren Kegelwinkel, hier ist die schmale Seite der Lamelle in der Bildebene abgebildet. Die Größe des Kollisionswinkel zwischen den beiden Jets hat nur geringen Einfluss auf den Gesamtkegelwinkel der Typ B Sprays, das Spray mit größerem Kollisionswinkel $\theta = 40^\circ$ ist etwas schmaler.

Die Erhöhung der Temperatur und des Drucks haben kaum Auswirkungen auf den Gesamtkegelwinkel, je nach Spray verhält sich der Kegelwinkel unterschiedlich. Außerdem verbleibt der Kegelwinkel für alle Sprays im zeitlichen Verlauf auf einem Niveau, was für eine reproduzierbare Kollision bei den Twinjetsprays spricht. Leichte Abweichungen treten zu Beginn der Einspritzung, bis sich ein stationärer Kegelwinkel ausgebildet hat, auf. Ab diesem Zeitpunkt bis zur Verdampfung ist der Kegelwinkel stabil. Eine Erhöhung des Einspritzdrucks (Abbildung 5.15 rechts) hat, ebenso wie die Erhöhung der Temperatur, keine Auswirkungen auf den Gesamtspraykegelwinkel.

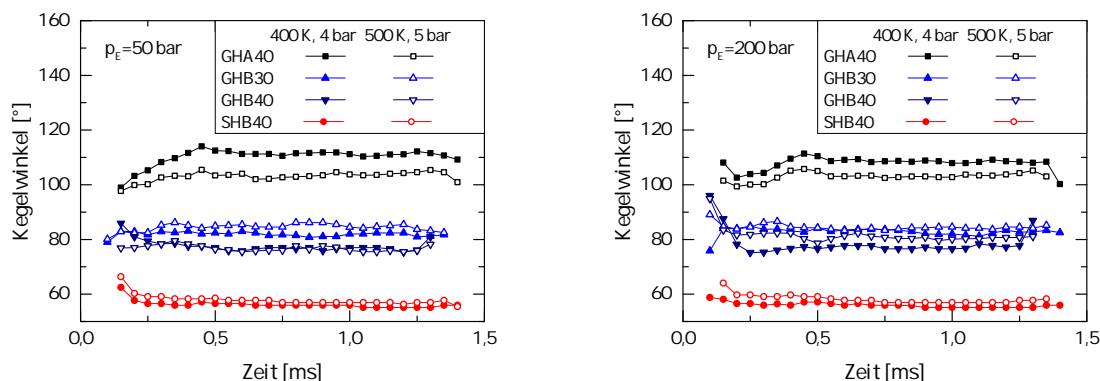


Abbildung 5.15: Gesamtspraykegelwinkelverläufe für die vier verschiedenen Sprays bei einem Einspritzdruck von 50 bar links und für 200 bar rechts, Mittelwerte über 100 Einspritzungen

Die Robustheit des Kegelwinkels gegenüber eines Anstieges in der Temperatur sowie auch des Einspritzdrucks ist für die Sprayauslegung ein sehr wertvoller Parameter, da sie diese deutlich vereinfacht.

5.5.3 Verdampfungsdauer

Da die Gemischbildung innerhalb kürzester Zeit ablaufen muss, ist eine schnelle Verdampfung für eine gute Gemischbildung essentiell. Bei der Einspritzung in den Motor ist nur wenig Zeit für die Einspritzung, innerhalb derer die Zerstäubung, Gemischbildung und Verdampfung erfolgen muss.

Abbildung 5.16 zeigt die Verdampfungsdauer, dargestellt in einem Histogramm für einen Einspritzdruck von 50 bar links und für 200 bar rechts für die vier verschiedenen Spraytypen, für $T_g = 400$ K und $p_g = 4$ bar sowie für $T_g = 500$ K und $p_g = 5$ bar. Bei Betrachtung der Ergebnisse muss beachtet werden, dass bei den Twinjetsprays die doppelte Menge an Kraftstoff eingespritzt (vgl. Abschnitt 5.2) und verdampft wird. Bei höheren Einspritzdrücken wird bei einer gleich lang andauernden Einspritzung mehr Kraftstoff pro Zeitraum eingespritzt. Um die Verdampfungsdauer der Sprays zu bestimmen, werden pro Betriebspunkt 100 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ausgewertet und gemittelt. Das Spray wird, wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, mittels vorgegebenem Schwellwert binarisiert. Die Verdampfungsdauer wird von Beginn der Einspritzung bis zu dem Zeitpunkt, zu dem kein Signal mehr oberhalb des Schwellwerts der Binarisierung detektierbar ist, bestimmt. Hierbei werden die globalen Aufnahmen der Sprays verwendet.

Die Verdampfungsdauer ist für die moderateren Umgebungsbedingungen bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar von Spraytyp zu Spraytyp sehr ähnlich. Die Verdampfungsdauer der Twinjetsprays liegt mit 2,5 ms im Bereich der Referenzdüse. Für die extremeren Bedingungen bei gleichbleibendem Einspritzdruck ist die Verdampfungsdauer für alle vier Spraytypen weiterhin sehr ähnlich. Die Twinjetsprays Typ B verdampfen im Vergleich zu dem Referenzspray SHB40 in gleicher Zeit die doppelte Menge an Kraftstoff. Lediglich die Verdampfung des GHA40 Twinjetsprays dauert mit $\delta t = 0,3$ ms etwas länger an. Durch die Temperatur- und Druckerhöhung um 100 K beziehungsweise 1 bar nimmt die Verdampfungsdauer je nach Spraytyp um 0,6 – 1,5 ms ab. Die Unterschiede in der Verdampfungsdauer werden geringer.

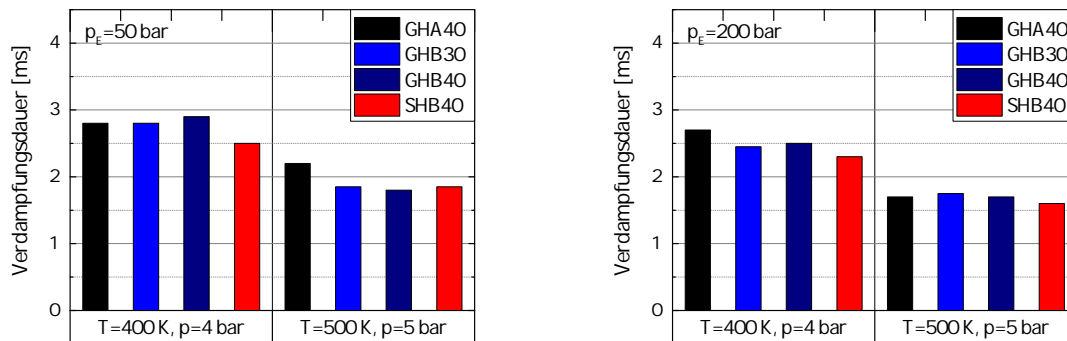


Abbildung 5.16: Verdampfungsdauer für die vier Spraytypen für einen Einspritzdruck von 50 bar links und für 200 bar rechts, dargestellte Werte sind Mittelwerte aus 100 Einspritzungen pro Betriebspunkt

Der höhere Einspritzdruck von $p_E = 200$ bar (Abbildung 5.16 rechts) unterstützt die Zerstäubung, die Verdampfung und folglich die Gemischbildung. Durch den höheren Druck entstehen kleinere Flüssigkeitströpfchen, die sich besser mit der Luft durchmischen und somit schneller verdampfen können. Deshalb ist die Verdampfungsdauer für den höheren Einspritzdruck, obwohl mehr Flüssigkeit eingespritzt wird, geringer. Für die moderateren Bedingungen nimmt die Verdampfungsdauer für den höheren Einspritzdruck im Mittel im Vergleich zu den Messungen bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar um 0,3 ms ab. Die Verdampfung der doppelten Flüssigkeitsmenge der Twinjetsprays, die alle auf dem gleichen zeitlichen Niveau liegen, ist nur noch geringfügig langsamer (0,2 ms) als für das Referenzspray. Bei den extremeren Umgebungsbedingungen liegt die Verdampfungsdauer für die vier verschiedenen Sprays auf einem Niveau bei ungefähr 1,8 ms. Auch hier nimmt die Flüssigkeitsreichweite im Vergleich zur Einspritzung mit geringerem Druck ab. Für die extremeren Bedingungen kann die doppelte Kraftstoffmenge der Twinjetsprays im gleichen Zeitraum wie die einfache Menge an Kraftstoff des Referenzsprays verdampft werden. Durch die Kollision der beiden Jets verteilt sich das Spray weiter im Raum, was die Durchmischung mit Luft begünstigt.

5.5.4 Verdampfungsverhalten in der Gesamtbetrachtung

Durch die weitere radiale Ausdehnung der Twinjetsprays auf kürzerer Strecke kann im Vergleich zum Referenzspray die doppelte Menge an Kraftstoff in gleicher Zeit verdampft werden. Durch die Kollision verteilen sich die Twinjetsprays mit kürzerer Penetration auf weiterer Fläche im Raum. Die Durchmischung mit umgebender Luft wird somit im Vergleich zu dem Referenzspray stärker gefördert. Twinjetsprays zeigen hinsichtlich des Verdampfungsverhaltens gegenüber dem Referenzspray Vorteile: Dies ist einerseits an der geringen Flüssigkeitsreichweite erkennbar. Zudem wird die doppelte eingebrachte Kraftstoffmenge innerhalb der gleichen Zeit verdampft.

Untersuchungen bei gleichgestellter Einspritzrate für Twinjetsprays und Referenzspray waren aufgrund der vorgefertigten Düsen nicht möglich. Inwieweit eine gleichgestellte eingespritzte Menge für das Referenzspray pro Zeitpunkt Einfluss auf das Verdampfungsverhalten des Referenzsprays hat, konnte bisher nicht gezeigt werden. Es wird von einer länger andauernden Verdampfung ausge-

gangen, sodass für die Twinjetdüsen bei gleichgestellter Kraftstoffmenge hinsichtlich Verdampfung und Gemischbildung ein größerer Vorteil zu erwarten ist.

Mittels Schattenaufnahmen kann nur der flüssige Anteil des Kraftstoffsprays abgebildet werden. Der Anteil des verdampften Sprays wird durch die Messtechnik der Schattenaufnahme nicht berücksichtigt. Für das Problem der Wandbenetzung und der daraus resultierenden Partikelbildung ist auch die Flüssigkeitsreichweite der Sprays entscheidend. Je geringer diese bei sonst gleichgestellten Bedingungen ist, desto schneller findet der Mischungsprozess und die Verdampfung der einzelnen Tröpfchen statt.

5.6 Airentrainment

Eine Schlüsselrolle für eine gute Durchmischung spielt das Airentrainment, schnelle und gute Gemischbildung ist abhängig von einer erhöhten Airentrainmentgeschwindigkeit. Hierbei ist die über das gesamte Volumen eingesaugte Luft entscheidend, die jedoch für die Twinjetdüsen nicht abgebildet werden kann. Mit PIV-Untersuchungen kann das sprayinduzierte Strömungsfeld der Gasphase in das Spray charakterisiert werden. Die Geschwindigkeiten sind aus 50 Einzelmessungen aufeinander folgender Einspritzungen zum gleichen Zeitpunkt gemittelt. So können saubere und vollständige Vektorfelder gewonnen werden, zudem wird der statistische Fehler minimiert. Hierbei werden im Gegensatz zu der PIV-Auswertung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (siehe Kapitel 4.5) Doppelbilder ausgewertet. Die einzelnen Messungen werden mittels konventionellem PIV Algorithmus, der Kreuzkorrelation, ausgewertet. Anschließend werden die 50 Vektorbilder gemittelt. Für die Auswertung wird eine Startgröße der betrachteten Ausschnitte von 128×128 Pixel gewählt. Die minimale Zielgröße hängt stark von der Seeding-Dichte ab und beträgt zwischen 32×32 Pixel und 16×16 Pixel. Die im vorherigen Abschnitt geäußerte Vermutung eines erhöhten Airentrainments aufgrund der höheren Verdampfungsrate kann mittels dieser Untersuchungen plausibilisiert werden.

5.6.1 Zeitlicher Airentrainmentverlauf

Durch die hohe Auflösung bei den Airentrainmentmessungen ist pro Einspritzung nur eine Aufnahme möglich. Um während der Einspritzung im Nahfeld der Düse einen Überblick über den zeitlichen Verlauf der Entrainmentgeschwindigkeit zu erhalten, sind in vorhergehender Abbildung aufeinanderfolgende Zeitpunkte dargestellt. Abbildung 5.17 zeigt den auf diese Weise gewonnenen zeitlichen Verlauf des Entrainments. Die Vektorfelder sind Mittelungen aus 50 Einzelaufnahmen zum entsprechenden Zeitpunkt.

Zu Beginn der Einspritzung ($t = 50 \mu\text{s}$) ist die Geschwindigkeit des Entrainments geringer, da das Spray noch nicht vollständig ausgebildet ist. Das Gas wird von der Sprayspitze verdrängt und strömt dann weiter stromaufwärts durch den sich im Spray bildenden Unterdruck. Die Richtung der Strömung unterscheidet sich von Punkt zu Punkt stark und bildet sich erst über die Dauer der Einspritzung aus. Bei $t = 300 \mu\text{s}$ wird das Maximum der Entrainmentgeschwindigkeit ($u \leq 12 \text{ m/s}$) erreicht. In diesem stationären Punkt strömt die Luft senkrecht auf das Spray zu. Die größte Airentrainmentgeschwindigkeit ist ungefähr $0,5 \text{ mm}$ stromabwärts vom Kollisionspunkt der beiden Jets zu finden. Dort zerfallen die Benzinstrahlen in kleinste Tröpfchen, was die wirksame Querschnittsfläche, über die der Impuls des Sprays an das umgebende Gas abgegeben wird, schlagartig vergrößert. Zu späteren Zeitpunkten nimmt die Entrainmentgeschwindigkeit aufgrund

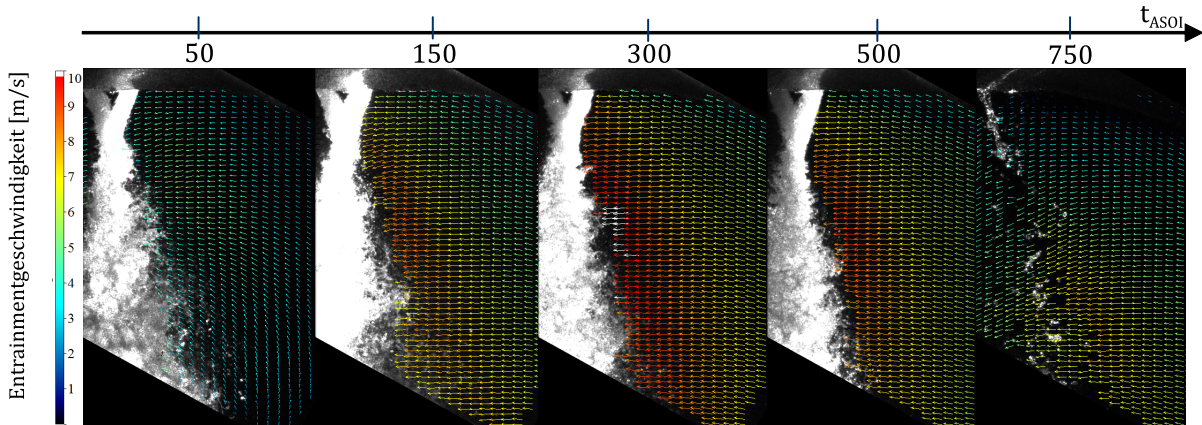


Abbildung 5.17: Zeitlicher Airentainmentverlauf der Twinjetdüse GHB40 bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar. Ausschnitt $1,5 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$, ausgewertet aus FPIV-Aufnahmen.

des Endes der Einspritzung wieder ab. Da die Entrainmentströmung bei $t_{\text{ASOI}} = 300 \mu\text{s}$ bereits voll ausgebildet ist und die höchsten Geschwindigkeiten erreicht werden, wird für die weiteren Auswertungen dieser Zeitpunkt betrachtet.

5.6.2 Druckabhängigkeit des Airentainments

Die Abhängigkeit der Entrainmentgeschwindigkeit vom Einspritzdruck ist ein gutes Merkmal zur Validierung der PIV-Untersuchungen, da die Entrainmentgeschwindigkeit der Bernoulli-Relation (Gleichung 2.5) folgt. Zur Prüfung werden Messungen für Einspritzdrücke zwischen 10 und 200 bar durchgeführt. Abbildung 5.18 zeigt die für die Twinjetdüse GHB40 aufgetragene horizontale Geschwindigkeitskomponente entlang eines horizontalen Profils in einem Abstand von $z = 1 \text{ mm}$ von der Düsen Spitze für alle gemessenen Einspritzdrücke. Wie erwartet bewirken höhere Einspritzdrücke eine höhere Airentainmentgeschwindigkeit in das Spray (linke Abbildung). Die Geschwindigkeit nimmt in Richtung des Sprays immer weiter zu und erreicht das Maximum direkt am Sprayrand. Der Sprayrand ist der Ort, an dem die Messungen am schwierigsten auswertbar sind, da sich hier Tröpfchen, die sich vom Spray gelöst haben, unter die Tracer der Luft mischen und sich mit der Geschwindigkeit des Sprays und nicht mit der der Luft bewegen.

Die Normierung der Geschwindigkeit auf die theoretisch hergeleitete Bernoulli-Geschwindigkeit ist in der Abbildung 5.18 rechts veranschaulicht. Für die mittleren Einspritzdrücke 20, 30 und 50 bar fallen die Kurven wie erwartet zusammen, während es bei 10 und 200 bar Abweichungen vom Verlauf, vor allem in der Nähe des Sprays ($x \leq 1 \text{ mm}$), gibt. Bei einem Einspritzdruck von $p_E = 200$ bar ist das durch das Spray gestreute Licht bereits so stark, dass die Auswertung, gerade in Spraynähe ($x < 1 \text{ mm}$) schwierig und im Nahbereich größtenteils fehlerhaft ist. Der Verlauf der Entrainmentgeschwindigkeit für einen Einspritzdruck von 200 bar unterscheidet sich zu dem der niedrigeren Einspritzdrücke. Niedrige Einspritzdrücke ($p_E < 20$ bar) sind mit Hilfe des Druckübersetzers schwierig einstellbar, sodass es hier bei der Einstellung des Einspritzdrucks zu größeren Unsicherheiten kommt. Die hier ermittelte Airentainmentgeschwindigkeit passt zu einem Einspritzdruck von $p_E = 15$ bar, der eventuell falsch eingestellt wurde. Für die weiteren

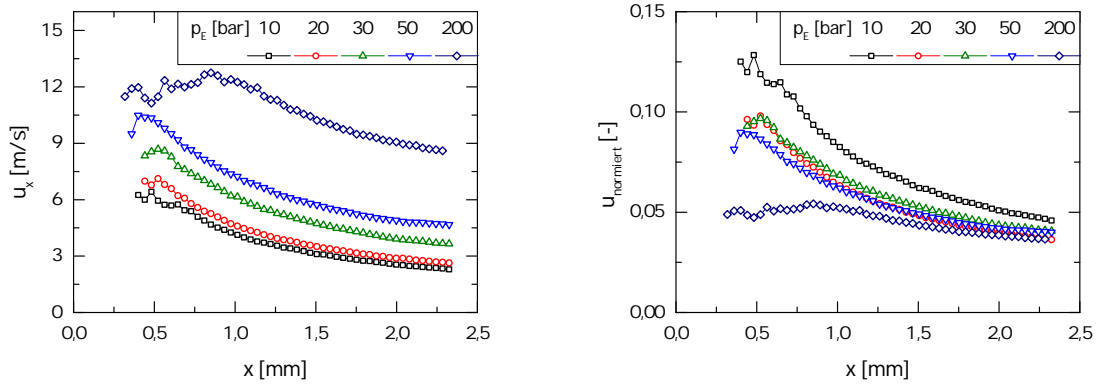


Abbildung 5.18: Airentrainmentgeschwindigkeit der Twinjetdüse GHB40 bei verschiedenen Einspritzdrücken entlang eines horizontalen Profils in einem Abstand von $z = 1$ mm, ausgewertet bei $t_{ASOI} = 300 \mu s$. In der linken Abbildung sind absolute Werte dargestellt, rechts auf Bernoulli-Geschwindigkeit normierte Werte.

Betrachtungen wurde der Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar verwendet, für den die Bernoulli-Normierung passend ist.

5.6.3 Vergleich des Entrainments für verschiedenen Düsen

Um die Entrainmentgeschwindigkeiten und -strömungen quantitativ zu vergleichen, werden Geschwindigkeitsprofile sowohl aus dem Nahfeld als auch aus globalen Aufnahmen des Sprays für die verschiedenen Spraytypen betrachtet und verglichen. Entrainmentuntersuchungen werden hauptsächlich an den Typ B Sprays durchgeführt, da hier der Bereich um das Spray besser zugänglich ist und somit die Auswertung einfacher und mit höherer Qualität erfolgen kann.

Nahfeld des Sprays

Um die Entrainmentströmung der unterschiedlichen Düsen in das Spray quantitativ zu vergleichen, werden Geschwindigkeitsprofile in einem Abstand von $z = 1$ mm zur Düse aus den Vektorfeldern extrahiert. Hierbei wird der Nahbereich betrachtet, da dort die stärksten Unterschiede der Twinjetsprays zum Referenzspray zu erwarten sind. In Abbildung 5.19 rechts ist das horizontale Profil in einem Abstand von $z = 1$ mm bei $t_{ASOI} = 300 \mu s$ dargestellt. Da die Referenzdüse effektiv nur den halben Massendurchsatz der Twinjetdüse aufweist, wird die Entrainmentgeschwindigkeit zum besseren Vergleich skaliert. Dabei folgt aus Gleichung 2.9, dass eine mit den Twinjetdüsen vergleichbare Referenzdüse mit dem doppelten hydraulischen Massenstrom eine um $\sqrt{2}$ -fache erhöhte Entrainmentgeschwindigkeit induzieren würde.

Beim Betrachten der Abbildung wird deutlich, dass die Twinjetsprays, trotz Hochskalierung der ermittelten Geschwindigkeitswerte der Referenzdüse SHB40, wesentlich höhere Entrainmentgeschwindigkeiten induzieren als das Referenzspray. Des Weiteren liegen die induzierten Entrainmentgeschwindigkeiten für die Twinjetdüse GHB40 konsequent über denen der Twinjetdüse GHB30. Der größere Kollisionswinkel zwischen den beiden Jets sorgt für eine stärkere Abbremsung und Aufweitung des Sprays und somit für eine höhere Geschwindigkeit der induzierten Gasströmung.

Bis auf diese Unterschiede sind die Trends, die in Abbildung 5.19 dargestellt sind, ähnlich. Mit steigendem Abstand von der Sprayachse nimmt die Airentainmentgeschwindigkeit ab. Für die Referenzdüse kann der erwartete Trend $u_n \propto 1/x$ wegen der näherungsweisen Rotationssymmetrie des Sprays angenommen werden. Eine Trendlinie ist ebenfalls in der Abbildung eingezeichnet, sie stimmt bis auf den Nahbereich gut mit den gemessenen Werten überein. In ausreichendem Abstand von der Sprayachse kann dieser Trend auch für die Twinjetsprays beobachtet werden.

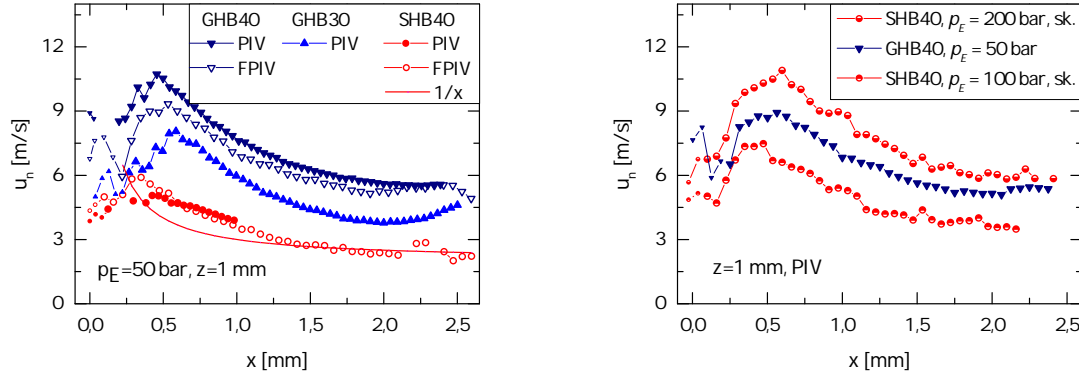


Abbildung 5.19: Horizontales Geschwindigkeitsprofil für die Twinjetdüsen GHB30 und GHB40 sowie die Referenzdüse bei $t_{ASOI} = 300 \mu s$ und $p_E = 50$ bar, links. Zusätzlich ist ein Fit von $1/x$ an den Geschwindigkeitsverlauf des Referenzsprays SHB40 dargestellt. Darstellung des horizontalen Geschwindigkeitsprofils für die Twinjetdüsen GHB40 für $p_E = 50$ bar Einspritzdruck im Vergleich zu der Referenzdüse mit einem Einspritzdruck von $p_E = 100$ bar bzw. $p_E = 200$ bar rechts. Ergebnisse im Nahfeld aus PIV- und FPIV-Messungen. Punkte mit einer Standardabweichung im Bereich von $0,2 - 0,5$ ms sind kleiner dargestellt, für alle anderen Punkte sind die Werte der Standardabweichung geringer. Der Punkt $x = 0$ mm liegt direkt am Rand des Sprays.

Beim Vergleich der mit den unterschiedlichen Techniken PIV und FPIV gemessenen Geschwindigkeitswerte können annäherungsweise die gleichen Werte und Verläufe für die Airentainmentgeschwindigkeit ermittelt werden. Im Nahbereich der Düse ($z_s \leq 1$ mm) können geringe Unterschiede detektiert werden, was aus dem Einfluss von Flüssigkeitströpfchen resultiert, aber auch den leicht unterschiedlichen Betriebsbedingungen zwischen PIV und FPIV geschuldet sein kann (siehe Kapitel 3.3.4). Ursache hierfür kann zum einen die fehlende Trennung zwischen Spray und Tracer sowie zum anderen unterschiedliche Geschwindigkeiten gerade im Grenzbereich sein. In den FPIV Experimenten ist die Konzentration der fluoreszierenden Tröpfchen im Nahbereich der Düse im Vergleich zu den PIV Experimenten geringer und weniger homogen (vor allem in der Nähe des Kammerdachs). Der Aerosolgenerator benötigt Überdruck gegenüber des atmosphärischen Drucks in der Kammer, um einerseits die Flüssigkeit in kleine Tröpfchen zu zerstäuben und um andererseits diese Tröpfchen in die Kammer zu transportieren. Ein Gleichgewicht dieser beiden Effekte ist von den Eigenschaften der zu zerstäubenden Flüssigkeit abhängig und schafft somit Grenzen für mögliche Seeding Strategien. Falls ein ähnlich dichtes und homogen verteiltes Seeding für die FPIV technisch umsetzbar wäre, ist FPIV die zu favorisierende Technik zur Untersuchung des Strömungsfeldes für alle Betriebsbedingungen. Aus Abbildung 5.19 links wird deutlich, dass beide Techniken, PIV und FPIV, zu vergleichbaren und plausiblen Ergebnissen führen. Die geringfügig abweichenden Werte der FPIV Messungen können auf die leicht unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zurückgeführt werden.

Abbildung 5.19 rechts zeigt die Entrainmentgeschwindigkeit für das Twinjetspray GHB40 für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar im Vergleich mit der vom Referenzspray induzierten Entrainmentgeschwindigkeit für einen Einspritzdruck von 100 bar beziehungsweise 200 bar (skaliert mit dem Faktor $\sqrt{2}$). Bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar induziert die Twinjetdüse eine Entrainmentgeschwindigkeit für die das Referenzspray einen Einspritzdruck zwischen 100–200 bar benötigt. Durch diese Darstellung werden die Vorteile der Twinjetdüse offenkundig.

Beide Diagramme der Abbildung 5.19 zeigen ein stärkeres Airentrainment bei Sprays der Twinjetdüsen. Für die Gemischbildung ist nicht der absolute Wert der Geschwindigkeit des einströmenden Gases entscheidend, sondern die Einspritzrate, die mit dem Faktor $\sqrt{p_E - p_g}$ skaliert. Das Verhältnis aus Airentrainment zum Massenstrom ist somit für die Twinjetdüsen im Vergleich zur Referenzdüse vorteilhafter. Es ist angemessen anzunehmen, dass die weitere Ausbreitung der Twinjetsprays eine wichtige Rolle für die signifikant höhere Entrainmentgeschwindigkeit der Twinjetsprays spielt. Für das Referenzspray liegt der Kegelwinkel des gesamten Sprays bei 12° ($p_E = 50$ bar), für das Twinjetspray GHB40 liegt der Winkel bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar bei 40° entlang der schmalen Seite und bei 60° entlang der breiten Seiten der Lamelle (vgl. Abschnitt 5.3). Das Volumen, das durch das Twinjetspray eingenommen wird und in das das umgebende Gas hinein beschleunigt wird, ist deutlich größer. Dementsprechend fallen auch die Unterdruckzonen im Spray, die das Airentrainment antreiben, deutlich größer aus.

Die Diagramme in diesem Abschnitt stellen heraus, dass das Entrainment in das Spray einer Twinjetdüse wesentlich intensiver ist. Trotz dieser vielversprechenden Ergebnisse, die die Hypothese eines deutlich effizienteren Zerstäubungsmechanismus stärken, sollte nicht vergessen werden, dass eine Betrachtung der Gesamtgasmasse, die in das Twinjetspray eingeogen wird, mit den durchgeführten Untersuchungen nicht möglich ist. Die Spraystruktur und somit die umgebende Gasströmung sind komplex und dreidimensional, für Untersuchungen ist jedoch nur eine Ebene zugänglich und Annahmen zur Symmetrie können bei den Twinjetsprays nicht genutzt werden, um die fehlenden Werte zu extrapolieren.

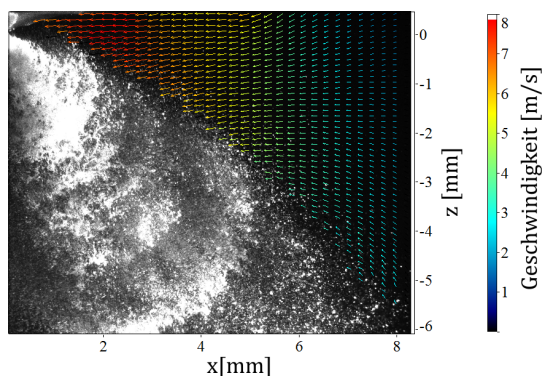


Abbildung 5.20: Geschwindigkeitsfeld im Nahbereich des Sprays GHA40 für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar

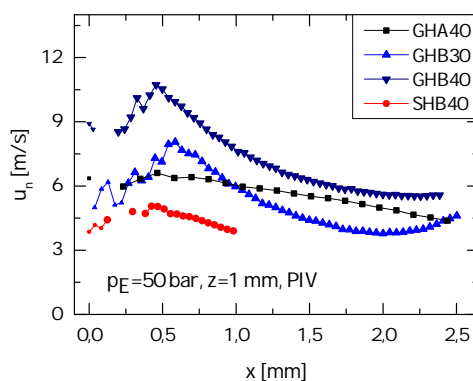


Abbildung 5.21: Horizontales Geschwindigkeitsprofil im Abstand von $z = 1$ mm von der Düsen Spitze für die verschiedenen Sprays für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar. Die Werte wurden aus PIV-Messungen ermittelt. Der Punkt $x = 0$ mm liegt direkt am Rand des Sprays.

In einer weiteren Darstellung in Abbildung 5.21 sind zur Ergänzung die Entrainmentgeschwindigkeiten der PIV Untersuchungen an der GHA40 Düse dargestellt. Bei der Typ A Düse nimmt das Spray, das hier der um 90° gedrehten Lamelle entspricht, im Nahbereich der Düse gut erkennbar sehr viel Raum ein, wie in Abbildung 5.20 zu sehen ist. Die höchsten Geschwindigkeiten sind im Nahbereich der Düse, am Kollisionspunkt direkt am Dach der Kammer, zu finden. Für die Entrainmentströmung bleibt zwischen Spray und Düse sehr wenig Platz, sodass die Strömung einen anderen Verlauf annimmt, wie die Auswertung entlang eines Profils in einem Abstand von $z = 1 \text{ mm}$ in Abbildung 5.21 herausstellt. Die Geschwindigkeit steigt zum Spray hin an, jedoch nicht wie bei dem Typ B und der Referenzdüse in exponentiellem Verlauf. Die ermittelte Entrainmentgeschwindigkeit liegt im Bereich der des Twinjetsprays GHB30. Weiter vom Spray entfernt liegt diese für das GHA40 Spray höher, im Nahbereich etwas darunter. Die Strömung in die flache Seite der Lamelle ist bei gleichgestelltem Kollisionswinkel von 40° zwischen den Jets (Typ A Ansicht) um ca. 25 % niedriger. Dennoch ist die Strömung auch an dieser Seite der Lamelle noch deutlich höher als die skalierte Entrainmentgeschwindigkeit für das Referenzspray.

Bei den Twinjetsprays ist ein Großteil der Oberfläche von der langen Seite der Lamelle geprägt. Deshalb kann in einer abschließenden Gesamtbetrachtung des Twinjetsprays davon ausgegangen werden, dass die sprayinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten und somit auch die induzierte Gasmasse deutlich höher sind als die für das Referenzspray bei sich gleichenden Randbedingungen.

Fernfeld des Sprays

Um eine ganzheitliche Aussage zum Airentainment treffen zu können, werden zusätzlich Aufnahmen vom Gesamtspray analysiert. Hier wurde jedoch nur der Typ B der Twinjetsprays charakterisiert, da deren Auswertung stabiler möglich ist. In Abbildung 5.22 fällt auf, dass die Penetration der Twinjetsprays kürzer ist und sie einen größeren Kegelwinkel und eine deutlich höhere Geschwindigkeit des einströmenden Gases aufweisen. Die Entrainmentgeschwindigkeiten sind für beide Sprays im Nahbereich der Düse am höchsten. Sie erreichen für das Twinjetspray bei 50 bar Werte bis zu 8 m/s , für das Referenzspray Werte bis zu 3 m/s . Auch im Innenbereich der Sprays ist die Entrainmentgeschwindigkeit des umgebenden Gases für das Twinjetspray deutlich höher, zudem ist bei den Twinjetsprays des Typs B deutlich mehr Raum im Kern des Sprays, aus dem Gas in das Spray gezogen werden kann. Durch die Abschwächung des Laserlichtes durch das Spray im Innenbereich sollte aber jeweils nur die äußere Seite zur detaillierten Betrachtung genutzt werden.

Horizontale Airentainmentgeschwindigkeitsprofile in weiteren Abständen zur Düse von $z = 10$, 20 und 30 mm sind in Abbildung 5.23 gezeigt. Die globalen Untersuchungen wurden mittels FPIV durchgeführt. Für alle betrachteten Positionen sprayabwärts ist die Entrainmentgeschwindigkeit für die Twinjetdüsen im Vergleich zum skalierten Wert der Referenzdüse höher. Der Verlauf ist dem im Nahfeld ähnlich, jedoch ist der Geschwindigkeitsanstieg zum Sprayrand nicht mehr so ausgeprägt wie im Nahbereich. Im Abstand von $z = 10 \text{ mm}$ induziert das Twinjetspray Strömungen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 6 m/s . In den größeren Abständen nimmt die ermittelte Geschwindigkeit immer weiter ab. Durch die Darstellung zeigt sich, dass das erhöhte Airentainment der Twinjetdüsen im Vergleich zur Referenzdüse nicht auf den Düsennahbereich begrenzt ist. Die integrale Masse der einströmenden Luft ist für Twinjetdüsen signifikant höher als für die Referenzdüse. Jedoch muss beachtet werden, dass die betrachteten Abstände von der Düsenspitze durch die unterschiedliche Penetration der Twinjet- und Referenzsprays nicht den gleichen Stellen im Spray entsprechen, wie Abbildung 5.22 verdeutlicht. Im Nahfeld des Sprays überlappen sich

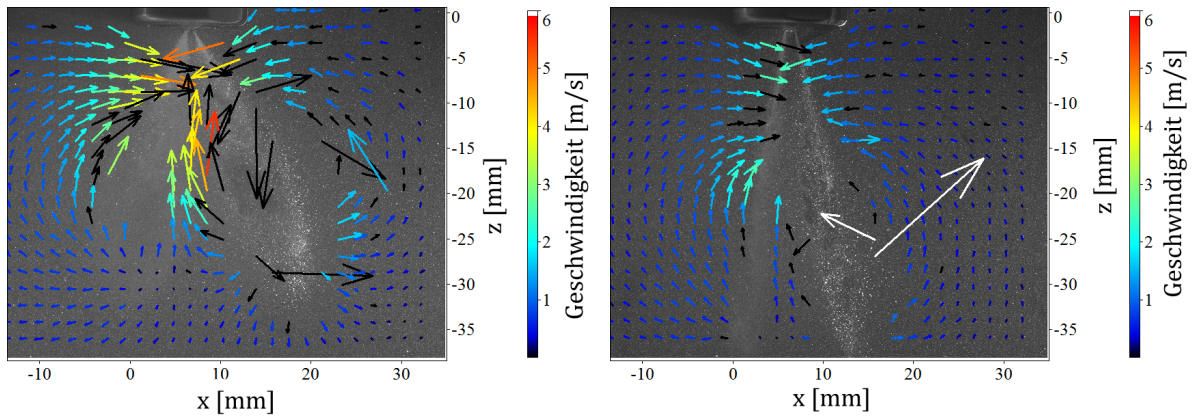


Abbildung 5.22: Gesamtansicht (aus FPIV-Messungen) der Sprays GHB40 (links) und SHB40 (rechts) bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar. Das jeweils rechte Spray liegt im Lichtschnitt, der von der rechten Seite eingekoppelt wird, links überlappen sich jeweils die beiden anderen Sprays.

Kraftstofftröpfchen und Tracer, die Auswertung der Doppelbilder ist in diesem Bereich deutlich anspruchsvoller. Dies führt zu höheren Unsicherheiten und somit höheren Standardabweichungen im resultierenden Geschwindigkeitsfeld.

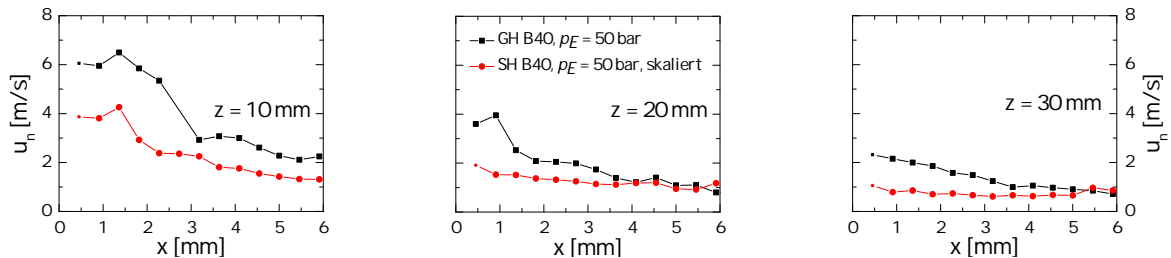


Abbildung 5.23: Airentrainmentgeschwindigkeit in verschiedenen Abständen zur Injektorspitze für Twinjet- und Referenzdüse. FPIV Untersuchungen, 0,3 ms nach Beginn der Einspritzung für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar. Werte mit einer Standardabweichung größer als 0,3 m/s sind als kleinere Punkte dargestellt.

5.6.4 Airentrainment in der Gesamtbetrachtung

Die Airentrainmentgeschwindigkeiten, die durch Twinjetsprays induziert werden, sind sowohl im Nahbereich als auch in der globalen Ansicht höher als die von Referenzsprays induzierten Geschwindigkeiten. Die analysierten Geschwindigkeitsfelder gelten nur für die im Lichtschnitt betrachtete Ebene. Die gesamte Entrainmentströmung ist jedoch stark dreidimensional ausgeprägt, deswegen können die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf das Gesamtspray übertragen werden. Die untersuchten Düsen haben drei Spritzlochpaare, sodass der Bereich zwischen den Einzelsprays und im Inneren des Sprays andere Strömungsbedingungen aufweist als auf der betrachteten Außenseite.

Das Airentrainment der Referenzdüse kann als näherungsweise rotationssymmetrisch betrachtet werden. Dies gilt nicht für die Twinjetdüsen. Durch die Ausbildung der turbulenten Lamelle zwischen den beiden Jets entsteht ein elliptisches Spray. Durch die unterschiedlichen Düsenarten (Typ A und Typ B) kann sowohl das Entrainment an der langen als auch an der kurzen Achse der Ellipse dargestellt werden. Voraussetzung ist hier ein fundamental ähnliches Strömungsfeld aus 2 komplementären Blickwinkeln. Das Auftreten von Geschwindigkeiten von bis zu 8 m/s bei einem Einspritzdruck von 50 bar legt nahe, dass das Entrainment entlang der schmalen Lamellenseite nur unwesentlich schwächer ist als an dessen breiter Seite. Bei einer rotationssymmetrischen Näherung der Typ-B Geschwindigkeiten wird das Gesamtentrainment wahrscheinlich leicht überschätzt. Neben dem 3D-Einfluss ist zu beachten, dass die hier betrachteten Abstände nicht völlig gleichzusetzen sind, da die Penetration der beiden Sprayarten unterschiedlich ist. Der Bereich, in dem das Entrainment stattfindet, ist für konventionelle Sprays durch die höhere Penetration auf einen größeren Bereich verteilt. Beim Vergleich der Kegelmantelflächen ist bei gleicher Penetration L_s die als Kegelmantel abgeschätzte Fläche des Twinjetsprays etwa doppelt so groß ($M_{Twinjet} = 1,4 \times L_s^2$; $M_{Referenz} = 0,7 \times L_s^2$). Die Penetration L_s der Twinjetsprays ist allerdings geringer, sodass bei einer verringerten Penetration um 30% die Kegelmantelflächen ungefähr gleich groß sind.

5.7 Tröpfchengrößenverteilung

Um die Charakterisierung der Twinjetsprays zu komplettieren, wird die Tröpfchengrößenverteilung der Sprays ermittelt. Sie gilt als eines der wichtigsten Gütekriterien von Benzinsprays. Kleinere Tröpfchen haben, bezogen auf das Volumen, eine größere Oberfläche, wodurch die heiße Luft besser in die Zwischenräume des Sprays eindringen kann. Ein Spray mit kleineren Tröpfchen kann daher schneller verdampfen und die Gemischbildung innerhalb kürzerer Zeit abschließen. Durch die Ergänzung der Penetrationsmessungen, die das andere zentrale Gütekriterium darstellen, kann die These bestätigt werden, da kleinere Tröpfchen durch die Luft schneller abgebremst werden.

Die Tröpfchengrößenverteilung innerhalb der drei Einzelsprays wird punktweise mittels Phasen-Doppler-Messtechnik gemessen. Die eigentliche Messtechnik ist diskret. In jedem Messpunkt werden Einzeltropfen mit den Eigenschaften t_i , D_i , u_i und v_i gemessen. Das Vermessen der Tröpfchen erfolgt zum Beispiel während einer Einspritzung kontinuierlich. Es wird ein quadratisches Raster abgefahren, in dem die drei Spraykeulen liegen. Messpunkte mit zu geringer Datenrate werden bei einem Abbruchkriterium von weniger als 10 Ereignissen (registrierte bzw. validierte Tröpfchen) im betrachteten Zeitfenster von 10 Sekunden übersprungen. Das Zentrum des Einzelsprays wird im Nachgang anhand der maximalen Axialgeschwindigkeit festgelegt. Für konventionelle Sprays ist diese Position im Mittelpunkt des runden Sprays. Durch die elliptische Form der Twinjetsprays variiert die Position mit der höchsten Axialgeschwindigkeit stärker und liegt nicht immer entlang der geometrischen Sprayachsen [104].

Das Phasen-Doppler-System liefert zwei Geschwindigkeitskomponenten und den Durchmesser der Tröpfchen, die das Messvolumen passieren. Messungen und Auswertungen werden anhand des Twinjetsprays GHB40 exemplarisch dargestellt: Zunächst eine Darstellung der Kontur des Sprays im Vergleich mit dem Referenzspray und anschließend die Darstellung der Axialgeschwindigkeit und des Tröpfchendurchmessers D_{10} über den zeitlichen Verlauf sowie abschließend die Tröpfchengrößenverteilung in Abhängigkeit vom Einspritzdruck und die Überprüfung der Korrelation zwischen Tröpfchendurchmesser und Tröpfchengeschwindigkeit.

Einspritzdruck p_E [bar]	Zeitbereich t [ms]
20	1,5 - 2,5
50	1,3 - 2,3
100	1,0 - 2,0
200	0,8 - 1,8

Tabelle 5.2: Stationäre Zeitbereiche bei PD Messungen in einem Abstand von $z = 30$ mm von der Düse

5.7.1 Konturplots

Um einen ersten Überblick über die Messungen zu erhalten, sind im Folgenden Konturplots der Verteilungen für das Twinjetspray GHB40 und das Referenzspray SHB40 abgebildet. Die betrachteten Eigenschaften der Tröpfchen werden für die unterschiedlichen Einspritzdrücke jeweils über einen quasi-stationären Zeitbereich, in dem die Einspritzung voll ausgeprägt ist, gemittelt. Die verwendeten Zeitfenster sind in Tabelle 5.2 dargestellt, die quasi-stationäre Sprayphase variiert mit dem Einspritzdruck. Abbildung 5.24 zeigt die Konturplots des Twinjetsprays GHB40, abgebildet sind die Axialgeschwindigkeit, der arithmetische Durchmesser D_{10} , die aufgenommenen Counts und die Validierungsrate über die gesamte Ebene in einem Abstand von $z = 30$ mm vom Düsenaustritt.

Messungen [66] haben gezeigt, dass das Strömungsfeld und die gemessene Tröpfchenrate stark korrelieren. In den Abschnitten mit höherer Strömungsgeschwindigkeit bewegt sich ein größerer Massenanteil durch das Messvolumen, somit werden auch mehr Proben aufgenommen. Als direkte Folge werden bei der Auswertung mittels arithmetischer Mittelung die Tröpfchen mit höherer Geschwindigkeit überbewertet [66]. Der sogenannte *velocity bias* ist vor allem bei der Mittelung und Statistik von Daten problematisch. Ein Weg, den *velocity bias* zu vermeiden, ist es, statistisch unabhängige Messungen durchzuführen. Hierfür muss der zeitliche Abstand zwischen zwei Burst-Signalen den der integralen Zeitskala des Strömungsfeldes der Tröpfchen um mindestens den Faktor 2 übersteigen. Dieser Abstand zwischen zwei Bursts und die integrale Zeitskala sind jedoch im Wesentlichen Sprayeigenschaften, wie die Größe vom Messvolumen auch. Die erreichbare Auflösung wird somit durch die Sicherstellung von statistisch unabhängigen Proben reduziert. Die integrale Zeitskala ist ein grobes Maß für die am längsten anhaltenden Verbindungen in turbulenten Strukturen. Des Weiteren ist es möglich, den *velocity bias* mittels einer nicht gleichförmigen Gewichtung auszugleichen. Die Methode, einen statistischen Mittelwert zu berechnen und den Fehler durch den *velocity bias* zu vermeiden, nutzt die *transit time*¹ Gewichtung. Grundlage der Betrachtung ist, dass die Zählrate, die in etwa dem Teilchenstrom entspricht, $\propto u$ ist.

$$\eta_i = \frac{t_i}{\sum_{j=0}^{N-1} t_j}, \propto \frac{1}{u_i}, \quad (5.1)$$

wobei t_i der transit time des i -ten Partikels entspricht, welches das Messvolumen passiert. Eine Gewichtung durch die transit time wird empfohlen [105]. Die Gewichtung soll vom unintuitiven Teilchenstrom hin zur intuitiven Teilchenkonzentration beziehungsweise Dichte führen. Für die Darstellung der charakteristischen Größen des Sprays in einer Ebene wird eine Gewichtung mittels transit time durchgeführt, wobei jedoch kaum Unterschiede im Vergleich zu den Resultaten

¹Die transit time entspricht der Zeit, die ein Tröpfchen benötigt, um das Messvolumen zu passieren. Sie repräsentiert die Anzahl der aufgenommenen Werte pro Messpunkt.

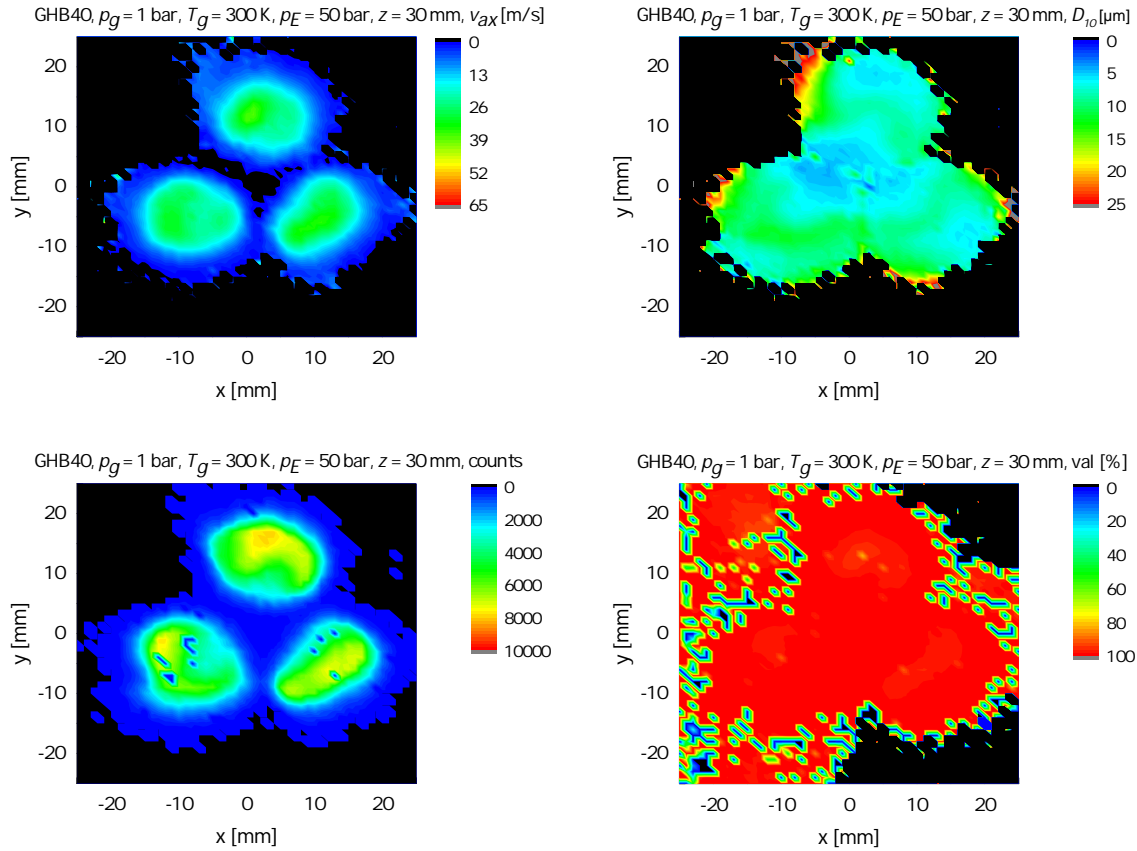


Abbildung 5.24: Konturplots für das Twinjetspray GHB40. Dargestellt sind von links oben nach rechts unten die Axialgeschwindigkeitskomponente, der mittlere Durchmesser D_{10} , die aufgenommenen Counts und die sphärische Validierung der gemessenen Tröpfchen. Einspritzdruck $p_E = 50$ bar, Messungen in einem Abstand von $z = 30$ mm.

ohne Gewichtung mittels transit time auftreten. Die Gewichtung wirkt vor allem, wenn die Geschwindigkeitsverteilung breit ist.

In den Konturplots fällt in allen vier Darstellungen die elliptische Form des Twinjetsprays auf. Die maximal gemessene Axialgeschwindigkeit (dargestellt oben links) verteilt sich auf einen größeren Bereich innerhalb der Ellipse und liegt bei $u = 30$ m/s. Um den inneren Bereich mit hohen Geschwindigkeiten bildet sich ein Sprayrand, in dem sich das Spray deutlich langsamer in axialer Richtung bewegt. Der Tröpfchendurchmesser D_{10} liegt für das Twinjetspray GHB40 in einem Bereich von $4 - 15 \mu$ m (Abbildung oben rechts). Bemerkenswert ist, dass die Bereiche mit den kleineren Tröpfchengrößen in den Randbereichen der langen Seite der Ellipse des Sprays entstehen. Der Konturplot mit der gemessenen Anzahl an Ereignissen (links unten dargestellt) zeigt eine hohe gemessene Datenmenge im Bereich des Sprays für die 120 betrachteten Einspritzungen pro Messpunkt. Die sphärische Validierungsrate (rechts unten dargestellt), die das Verhältnis aus den validierten Durchmesser-Proben zu den validierten Bursts darstellt, zeigt eine hohe Rate für den Bereich des Sprays mit sehr wenigen Fehlstellen. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich um eine gültige Messung handelt.

Abbildung 5.25 zeigt Konturplots für das Referenzspray SHB40. Im Vergleich zum Twinjetspray ist das Referenzspray ein rundes Spray mit ausgeprägtem Axialgeschwindigkeitsmaximum im Sprayzentrum. Die erreichten Geschwindigkeiten im Sprayzentrum sind um 60 % höher und auf einen Bereich von $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ konzentriert. Der Randbereich mit den deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten ist für das Referenzspray relativ betrachtet größer, absolut liegt er im gleichen Bereich. Bei Betrachtung der Tröpfchengrößenverteilung D_{10} (in der Abbildung 5.25 oben rechts) zeigt sich, dass die Größenverteilung hin zu größeren Durchmessern verschoben ist. Der Durchmesser D_{10} liegt für das Referenzspray in einem Bereich von $7 - 15\text{ }\mu\text{m}$ und ist gleichmäßig über das Spray verteilt. Am äußeren Rand der Sprays werden Tröpfchen mit deutlich größerem Durchmesser gemessen, dieser Trend ist für das Referenzspray deutlich ausgeprägter als für das Twinjetspray. Allgemein ist die Verteilung der Tröpfchengrößen innerhalb des Referenzsprays homogener als die des Twinjetsprays. Die gemessenen Counts (unten links) und die sphärische Validierungsrate (unten rechts) sind denen des Twinjetsprays sehr ähnlich, so dass auch hier von aussagekräftigen Messungen ausgegangen werden kann. Für die beiden anderen untersuchten Twinjetsprays liegen gemessene Counts und Validierungsrate im gleichen Bereich, weshalb diese nicht zusätzlich dargestellt werden. Die ermittelten Durchmesser und die Geschwindigkeitsverteilung für die beiden nicht abgebildeten Twinjetsprays liegen im gleichen Bereich wie für das dargestellte Twinjetspray GHB40.

Der betrachtete Messbereich ist für die Twinjetdüsen in einem Abstand von $z = 30\text{ mm}$ um $\pm 10\text{ mm}$ größer, da sich diese weiter im Raum ausbreiten, zum einen wegen der durch Kollision hervorgerufenen weiteren Ausbreitung, zum anderen wegen der doppelten Kraftstoffmenge, die pro Zeiteinheit eingespritzt wird. Da die Penetration der Twinjetdüsen geringer ist, wird die zweite Messebene in einem Abstand von $z = 50\text{ mm}$ nur teilweise erreicht, sodass sich die weiteren Betrachtungen auf den geringeren Abstand von $z = 30\text{ mm}$ fokussieren.

5.7.2 Profil entlang der Ellipsenachsen

Zwei zueinander orthogonale Profile werden in der betrachteten Ebene in einem Abstand von $z = 30\text{ mm}$ in die einzelnen Sprays gelegt, um die Verteilung der Tröpfchengrößen innerhalb einer Spraykeule genauer zu betrachten. Dabei liegt der x -Schnitt für die Twinjetsprays in der langen Seite der Ellipse, der y -Schnitt in der kurzen. Durch die Betrachtung des Schnitts kann der Tröpfchendurchmesser ohne eventuelle Verfälschung durch räumliche Mittelung dargestellt werden. Die dargestellten Daten sind, wie die Konturplots, zeitlich über den stationären Bereich gemittelt. Für die Vermessung des Profils entlang der Achsen werden alle drei Spraykeulen betrachtet. Da die Ergebnisse gut übereinstimmen, sind die Werte nur für Spraykeule 1 abgebildet. Spraykeule 1 ist diejenige mit dem geringsten x -Wert (vgl. Abbildung 5.24 und 5.25). Der Punkt $x = 0\text{ mm}$ ist der Punkt mit dem niedrigsten x -Wert am Rand des Sprays. Genauso verhält es sich für den y -Schnitt. Für das Referenzspray wurde das in Abbildung 5.25 dargestellte Koordinatensystem als Grundlage für die Schnitte gewählt.

Auf der linken Seite der Abbildung 5.26 ist der x -Schnitt durch die lange Seite der Ellipse und auf der rechten Seite der y -Schnitt durch die kurze Seite für alle vier untersuchten Spraytypen veranschaulicht. Beim x -Schnitt durch das Spray steigt die Tröpfchengröße am Rand des Sprays für die Twinjetsprays an. Die ermittelten Tröpfchengrößen liegen für alle vier Sprays in einer Größenordnung. Für den dazu orthogonal verlaufenden y -Schnitt nimmt die Tröpfchengröße nach außen hin für die Twinjetsprays ab. Das Referenzspray SHB40 besitzt über den y -Schnitt konstant große Tröpfchen, die in den Randbereichen des Schnitts um $3\text{ }\mu\text{m}$ größer sind als die der

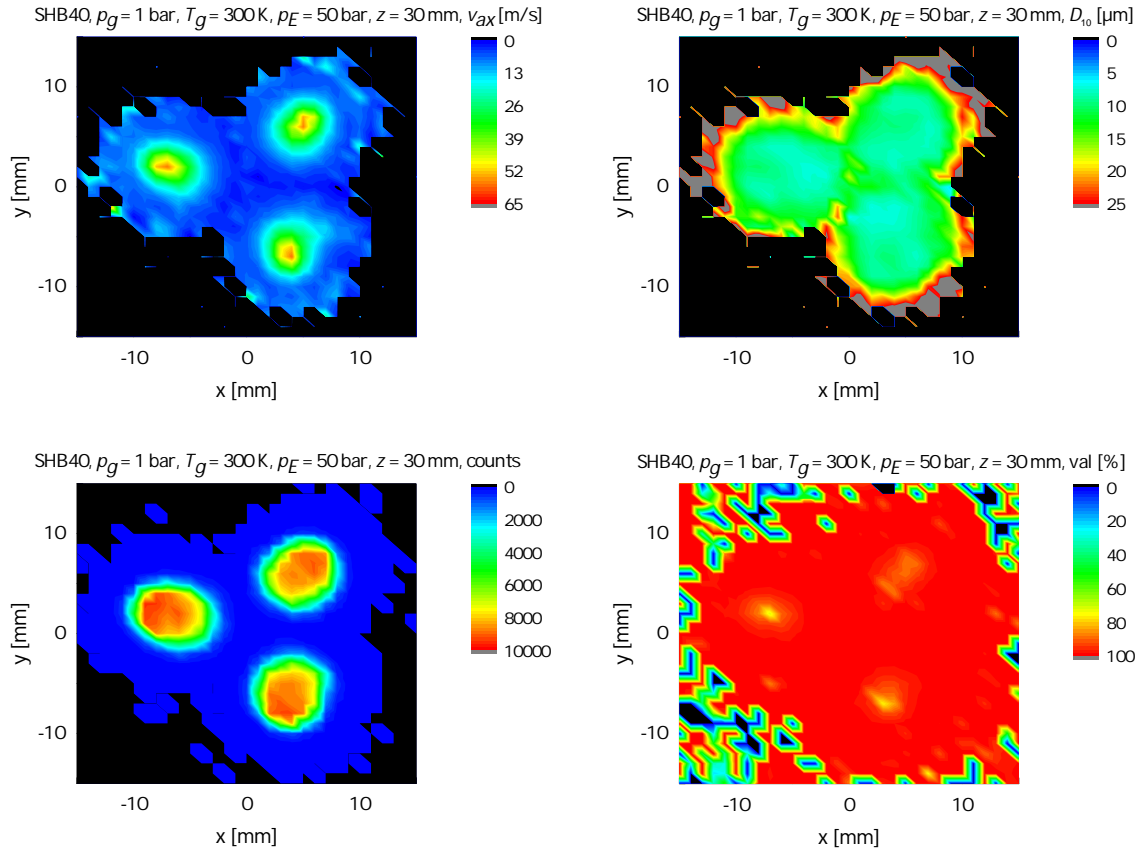


Abbildung 5.25: Konturplots für das Referenzspray SHB40. Dargestellt sind von links oben nach rechts unten die Axialgeschwindigkeitskomponente, der mittlere Durchmesser D_{10} , die aufgenommenen Counts und die sphärische Validierung der gemessenen Tröpfchen. Einspritzdruck $p_E = 50$ bar, Messungen in einem Abstand von $z = 30$ mm.

Twinjetsprays. Die Differenz der kleinsten und größten Tröpfchen im Schnitt, die sich jeweils in den Randbereichen befinden, liegt bei $\Delta d = 7 \mu\text{m}$. Für das Referenzspray nimmt die Tröpfchengröße in beiden betrachteten Schnitten nach außen hin leicht zu.

Der Trend, der sich schon aus den Konturplots (Abbildung 5.24 und 5.25) ableiten lässt, ist in diesen Grafiken wieder zu finden. Bei Betrachtung des Schnitts entlang der y -Achse zeigt sich, dass die Tröpfchengrößen in den Randbereichen für die Twinjetsprays kleiner sind. Für GHA40 und GHB30 ist dieser Effekt entlang des y -Schnitts deutlicher ausgeprägt. Die Tröpfchengrößen des Referenzsprays SHB40 liegen entlang des y -Schnitts gleichbleibend auf einem Wert, es gibt keine Tendenz zu kleineren Tröpfchen am Rand des Sprays. Der Anstieg der Tröpfchengröße am Seitenrand des x -Schnitts ist für das Referenzspray im gleichem Maße wie für die Twinjetsprays zu beobachten.

5.7.3 Zeitlicher Verlauf

Abbildung 5.27 zeigt den zeitlichen Verlauf der Axialgeschwindigkeit und des arithmetisch gemittelten Durchmessers D_{10} der während der Einspritzung aufgenommenen Tröpfchen als Punktwolke

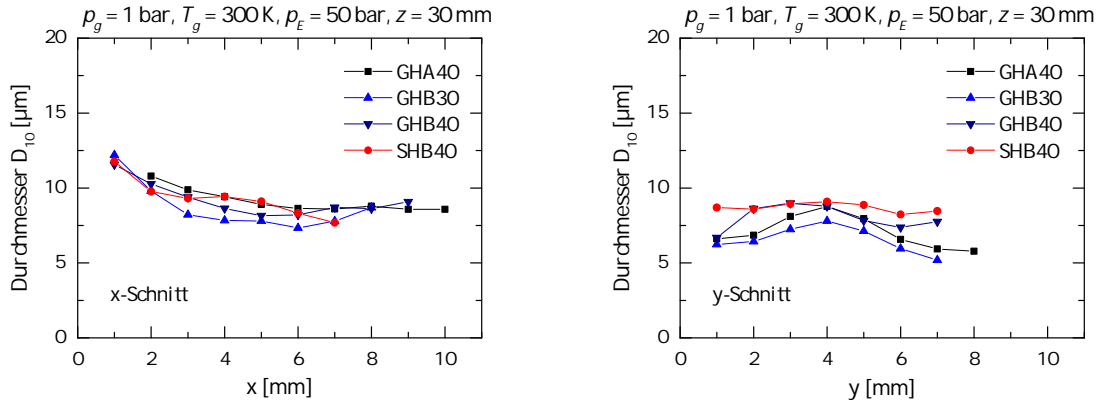


Abbildung 5.26: X-Schnitt (lange Seite der Ellipse) und y-Schnitt (kurze Seite der Ellipse) durch die vier betrachteten Sprays, Mittelung über die drei Einzelsprays, Einspritzdruck von $p_E = 50 \text{ bar}$, gemessen in einem Abstand von $z = 30 \text{ mm}$

für einen Einspritzdruck von $p_E = 50 \text{ bar}$ oben und $p_E = 200 \text{ bar}$ unten. Die Messposition liegt im Sprayzentrum eines Einzelsprays. Neben dem zeitlichen Verlauf der Axialgeschwindigkeit und des Durchmessers D_{10} liefert die Abbildung eine qualitative Darstellung der Datenrate.

Die Sprayspitze passiert das Messvolumen für den Einspritzdruck von $p_E = 50 \text{ bar}$ zwischen 1,2 und 1,5 ms nach Ansteuerbeginn des Injektors. Dieser Bereich zeichnet sich durch eine ansteigende Axialgeschwindigkeit aus. Der quasi-stationäre Bereich erstreckt sich, wie schon für die Konturdarstellung genutzt, über den Zeitraum von 1,3 – 2,3 ms. Nach dem Erreichen der Maximalgeschwindigkeit schließt sich eine Strahlschleppe an, die durch eine abfallende Geschwindigkeit erkennbar ist. Hier werden Tröpfchen detektiert, die nach Ende der Einspritzung noch im Messbereich vorhanden sind. Für den höheren Einspritzdruck von $p_E = 200 \text{ bar}$ (Abbildung 5.27 links unten) ist die Spitze des Sprays früher am Detektionsvolumen, zwischen 0,8 und 1 ms. Das Spray, das mit höherem Druck injiziert wird, erreicht die Ebene in einem Abstand von $z = 30 \text{ mm}$ um 0,4 ms früher. Der quasi-stationäre Bereich, in dem die Einspritzung voll ausgeprägt abläuft, ist für den höheren Einspritzdruck kürzer. Der mittels Phasen-Doppler-Messtechnik detektierte Beginn der Einspritzung passt bei den entsprechenden Einspritzdrücken und Spraytypen mit dem Zeitpunkt, der über Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für das Erreichen des Abstands von $z = 30 \text{ mm}$ bestimmt werden kann, gut zusammen.

Auffallend ist bei Betrachtung der Punktwolke als qualitative Datenrate, dass bei hohem Einspritzdruck von $p_E = 200 \text{ bar}$ im Zeitraum der Haupteinspritzung die Datenrate aufgrund des optisch deutlich dichteren Sprays abnimmt. Für den Zeitraum der Einspritzung können zum Teil nur vereinzelt Daten gewonnen werden. Für niedrigere Einspritzdrücke ($p_E \leq 50 \text{ bar}$) kann auch während der Einspritzung eine ausreichend hohe Datenrate erzielt werden. In höherem Abstand ($z > 30 \text{ mm}$) zur Düsenpitze weitet sich das Spray weiter auf und ist somit optisch weniger dicht. In diesen Abständen können Messungen mit höheren Datenraten erfolgen. Das dichtere Referenzspray liefert im Vergleich zu dem weiter aufgefächertem Twinjetspray deutlich weniger validierte Messpunkte pro Ebene für die 120 Einspritzungen.

Bei Betrachtung des Durchmessers (Abbildung 5.27 rechts) über den zeitlichen Verlauf ist ebenfalls die geringe Datenrate während der Haupteinspritzung, vor allem für einen Einspritzdruck von $p_E = 200 \text{ bar}$, zu erkennen. Außerdem zeigt sich im Vergleich der Kurven der verschiedenen

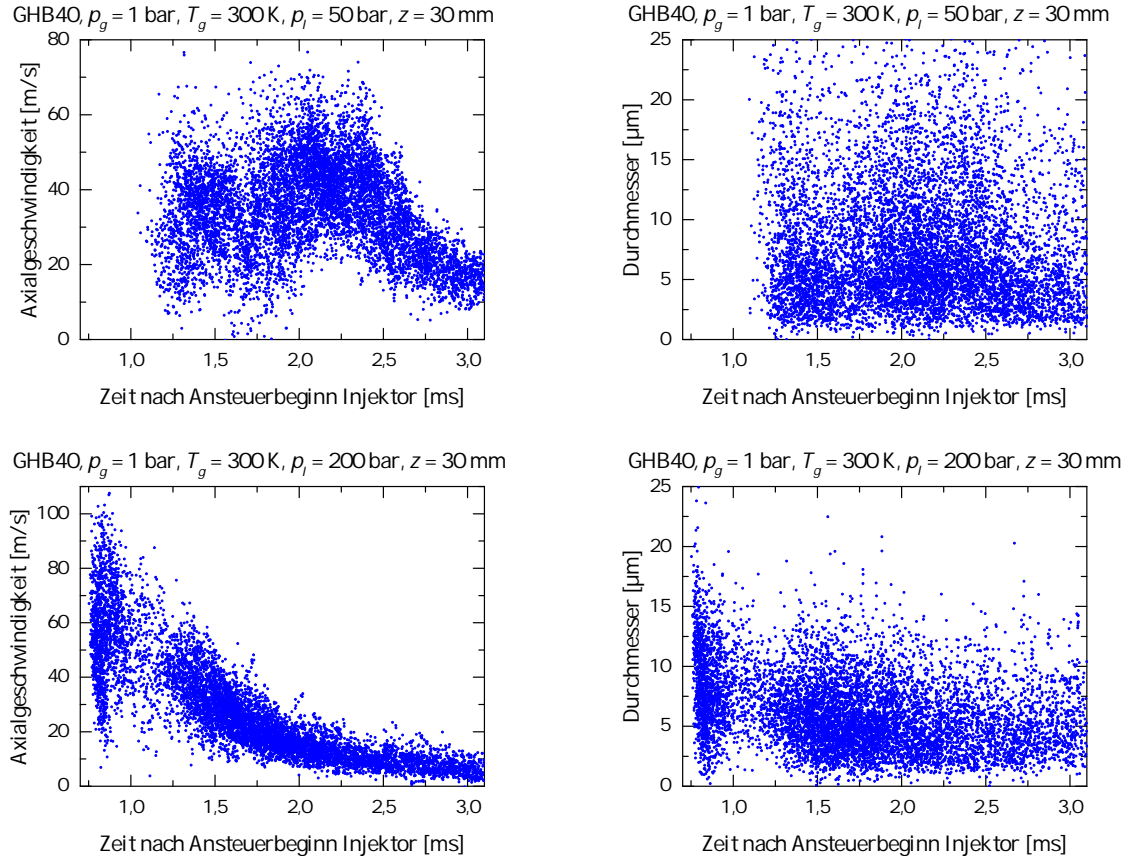


Abbildung 5.27: Zeitlicher Verlauf der Axialgeschwindigkeitskomponente und des Durchmessers D_{10} im Sprayzentrum von GHB40, Spritzloch 2, für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar und $p_E = 200$ bar, gemessen in einem Abstand von $z = 30$ mm

Einspritzdrücke, dass sich die Durchmesser- und Geschwindigkeitsverteilung für den niedrigeren Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar über einen größeren Bereich von $2 - 25 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $2 - 15 \mu\text{m}$ für die höheren Einspritzdrücke erstreckt. Über den zeitlichen Verlauf, auch nach Einspritzende, bleibt die Durchmesser- und Geschwindigkeitsverteilung auf konstantem Niveau.

In Abbildung 5.28 sind die Axialgeschwindigkeit und der arithmetische Durchmesser D_{10} für das Sprayzentrum der drei Einzelsprays der Twinjetdüse GHB40 exemplarisch dargestellt. Durch eine Unterteilung des Zeitbereichs in diskrete Abschnitte von $0,1$ ms und eine Mittelung der Werte, die in diese Abschnitte fallen, kann der zeitliche Verlauf übersichtlich abgebildet werden. Die Standardabweichung über die diskreten Bereiche ist in Fehlerbalken veranschaulicht. Beim Geschwindigkeitsverlauf im Sprayzentrum zeigen sich Unterschiede zwischen den drei einzelnen Spritzlöchern. Die Axialgeschwindigkeiten unterscheiden sich sowohl in den absoluten Werten als auch im zeitlichen Verlauf. Vor allem das Spray aus Spritzloch 1 zeigt niedrigere Geschwindigkeiten im Sprayzentrum. Im Zentrum des Sprays kann, wie in den Punktwolkenplots erkennbar, ein stationärer Bereich mit abschließendem Abfallen der Geschwindigkeit nach Ende der Einspritzung detektiert werden. Durch die Kollision der beiden Jets kann es innerhalb des Sprays zu Fluktuationen kommen. Der Ort, an dem die größte Geschwindigkeit auftritt und an dem das Sprayzentrum definiert ist, befindet sich nicht immer fest an einem Punkt. Für alle drei Verläufe kann ein leichtes Einbrechen der Geschwindigkeit $1,4$ ms nach Ansteuerbeginn beobachtet werden.

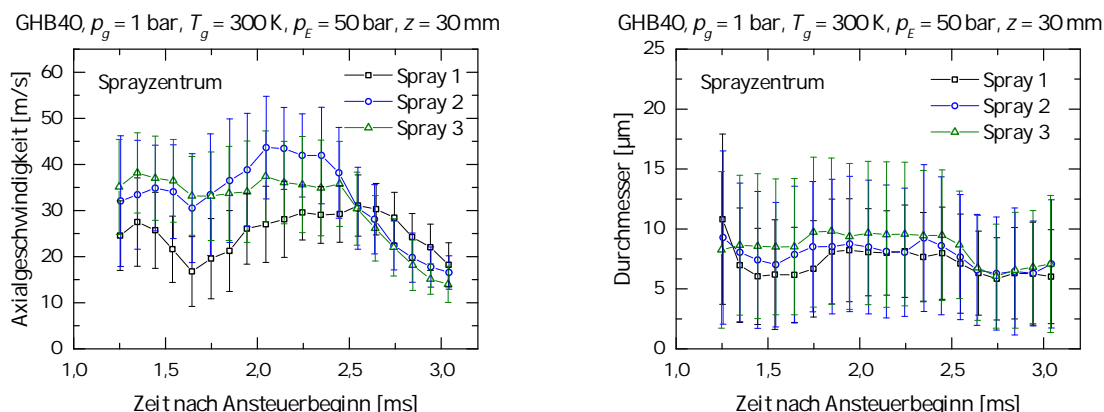


Abbildung 5.28: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Axialgeschwindigkeitskomponente und des Durchmessers D_{10} im Sprayzentrum des Twinjetsprays GHB40 für die drei Einzelsprays bei einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, gemessen in einem Abstand von $z = 30$ mm

Dies könnte die unter Kapitel 5.2 diskutierte Druckwelle sein, die für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar die Ebene in einem Abstand von $z = 30$ mm 1,4 ms nach Ansteuerbeginn erreicht.

Bei Betrachtung des Durchmesserverlaufs D_{10} (Abbildung 5.28 rechts) liegen die Verläufe der drei Sprayzentren in einem Größenbereich. Diese Tendenz lässt sich durch die anderen Spraytypen bestätigen. Aus diesem Grund wird auf diese nicht näher eingegangen. Der Durchmesser bleibt über dem zeitlichen Verlauf sehr stabil, weshalb eine Einschränkung auf einen stationären Bereich während der Einspritzung für den Durchmesser nicht unbedingt notwendig ist. Auch zu Zeitpunkten nach Ende der Einspritzung ($t > 2,3$ ms) ist der mittlere Tröpfchendurchmesser nur geringfügig kleiner.

Die Axialgeschwindigkeitskomponente und der Durchmesser D_{10} sind für die vier betrachteten Sprays im Sprayzentrum in Abbildung 5.29 veranschaulicht. Die Axialgeschwindigkeit liegt für das Referenzspray deutlich höher im Bereich von 60 bis 70 m/s, für die Twinjetsprays liegt die Geschwindigkeit übereinstimmend im Bereich von 30 bis 40 m/s im quasi-stationären Bereich. Das Referenzspray erreicht durch die höhere Geschwindigkeit früher die Messebene in einem Abstand von $z = 30$ mm. Durch die Kollision verlieren die Twinjetsprays nach vorne gerichteten Impuls, was in einer geringeren Axialgeschwindigkeit resultiert. Im zeitlichen Verlauf ist für alle vier Spraytypen die stationäre Phase während der Einspritzung mit anschließendem Abfall der Geschwindigkeit nach Ende der Einspritzung zu erkennen. Der Bereich der Standardabweichung, dargestellt mit Linien ober- und unterhalb der Messpunkte, liegt für die untersuchten Sprays im Bereich von 10 m/s. Bei Betrachtung des Durchmessers im zeitlichen Verlauf im Sprayzentrum bestätigt sich der Trend aus den zeitlich gemittelten Konturplots: Die Tröpfchen, die bei den Twinjetsprays entstehen, sind im Sprayzentrum etwas kleiner. Der zeitliche Verlauf ist für alle Düsen konstant, erst nach Ende der Einspritzung nimmt der Tröpfchendurchmesser leicht ab. Der Unterschied in der Geschwindigkeit ist für das globale Spray wesentlich größer als im Nahbereich.

Für höhere Einspritzdrücke verhält sich die Tröpfchengröße und -geschwindigkeit der Sprays im Zentrum ähnlich, wie aus Abbildung 5.30 ersichtlich ist. Die Axialgeschwindigkeitskomponente ist für die beiden höheren Einspritzdrücke für das Referenzspray deutlich größer. Für den Einspritzdruck von $p_E = 100$ bar ist der Geschwindigkeitsverlauf während der Einspritzung im stationären Bereich konstant. Durch die höhere Geschwindigkeit erreicht das Referenzspray die Messebene

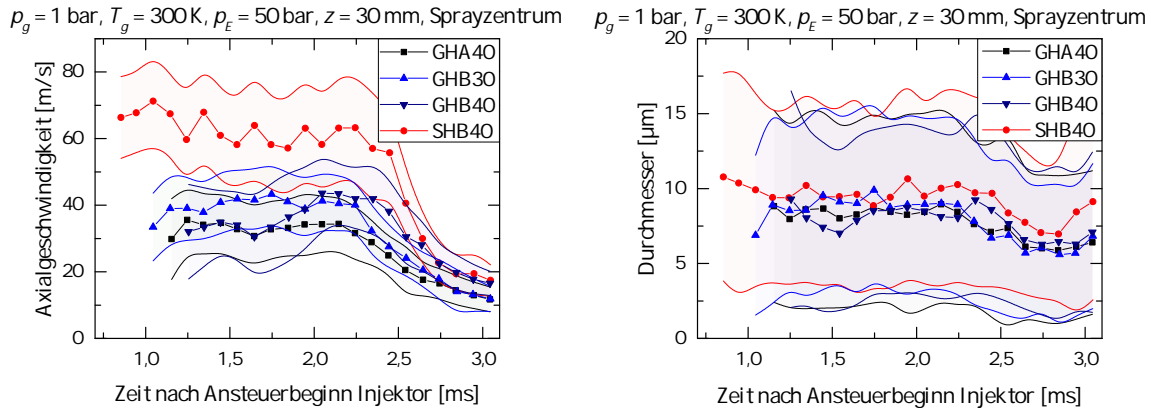


Abbildung 5.29: Zeitlicher Verlauf der Axialgeschwindigkeitskomponente und des Durchmessers D_{10} im Sprayzentrum von Spritzloch 2 für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, gemessen in einem Abstand von $z = 30$ mm von der Düsen Spitze. Die Standardabweichung ist als farbige Fläche hinter dem Verlauf dargestellt.

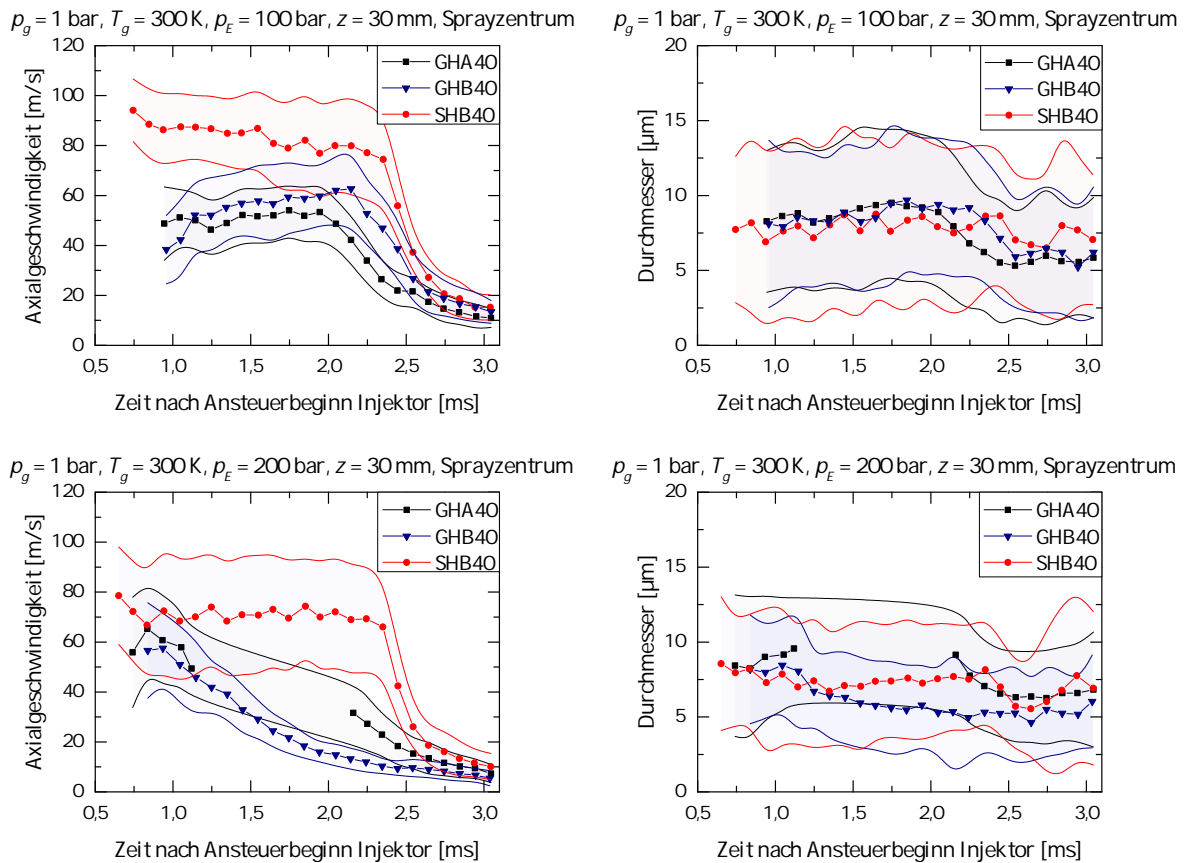


Abbildung 5.30: Zeitlicher Verlauf der Axialgeschwindigkeitskomponente und des Durchmessers D_{10} im Sprayzentrum von Spritzloch 2 für einen Einspritzdruck von $p_E = 100$ bar (oben) und von $p_E = 200$ bar (unten), gemessen in einem Abstand von $z = 30$ mm von der Düsen Spitze. Die Standardabweichung ist als farbige Fläche hinter dem Verlauf dargestellt.

früher. Die Tröpfchengröße im Sprayzentrum nimmt vor allem für das Referenzspray ab, wie es bei einer Druckzerstäubung durch höheren Druck erwartet wird. Die Tröpfchengrößen für das Twinjetspray sind auf dem selben Niveau wie für den niedrigeren Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar.

Für den Einspritzdruck von $p_E = 200$ bar ist es wegen der geringen Datenrate schwierig, verlässliche Aussagen über Tröpfchengröße und -geschwindigkeit im Sprayzentrum zu treffen. Die ermittelte Axialgeschwindigkeit ist geringer als für den Einspritzdruck von $p_E = 100$ bar und nimmt während der stationären Phase für die Twinjetsprays ab. Das deutet darauf hin, dass im Zentrum des dichten Sprays vermehrt langsamere Tröpfchen gemessen werden. Der Durchmesserbereich ist ähnlich zu dem bei $p_E = 100$ bar Einspritzdruck. In einem Abstand von $z = 50$ mm ist die optische Dichte des Sprays geringer, daher kann hier, gerade bei hohem Einspritzdruck, eine bessere Qualität der Datenrate erreicht werden. Für das Referenzspray SHB40 ist dies der Fall, die gemessenen Geschwindigkeiten liegen im Abstand von $z = 50$ mm im Mittel um 20 m/s unter der Geschwindigkeit von SHB40 (65 m/s), die in einem Abstand von $z = 30$ mm detektiert wird. Für die Twinjetsprays kann dazu keine Aussage getroffen werden, da die Penetration geringer als $z = 50$ mm ist und so nur wenige Tröpfchen die Ebene in größerem Abstand erreichen.

Über den zeitlichen Verlauf bildet sich im Sprayzentrum während der Einspritzung ein stationärer Bereich aus, in dem die Axialgeschwindigkeitskomponente sowie der Tröpfchendurchmesser D_{10} auf einem Niveau bleiben. Erst nach dem Ende der Einspritzung nimmt die Geschwindigkeit stark und auch der Tröpfchendurchmesser leicht ab. Diese Entwicklung kann für alle Einspritzdrücke unabhängig vom Spray beobachtet werden. Der Durchmesser der Tröpfchen stagniert mit steigendem Einspritzdruck für die Twinjetsprays. Hier scheint bei 50 bar ein Maximum für die Prallzerstäubung erreicht zu sein. Durch eine weitere Druckerhöhung kann der Mechanismus nicht weiter unterstützt werden. Bei dem Referenzspray hingegen unterstützt die Einspritzdruckerhöhung die Entstehung eines feiner zerstäubten Sprays im Sprayzentrum.

5.7.4 Gemittelte Tröpfchengrößenverteilung

Der Mittelwert D_{10} definiert den arithmetisch gemittelten Durchmesser aller Tröpfchen im Spray. Der Sauterdurchmesser SMD (D_{32}) ist der Durchmesser eines exemplarischen Tröpfchens, dessen Verhältnis von Volumen zu Oberfläche dem Verhältnis der gesamten Tröpfchenverteilung im Spray entspricht. Keiner der angeführten Durchmesser kann ein Spray komplett beschreiben, deswegen sind in den folgenden Abbildungen beide Durchmesser dargestellt.

Die Tröpfchengrößen sind über den stationären Bereich der Einspritzung gemittelt. Um den Fehler einer Überwertung der Randbereiche zu vermeiden und somit größere Tröpfchen überzugewichten, werden die gemessenen Tröpfchengrößen mittels der Anzahlkonzentration gewichtet [37, 114]. So werden die Randbereiche des Sprays, von denen es bei einem äquidistanten Raster mehr gibt als Messpunkte im Zentrum, anhand der Anzahlkonzentration gewichtet. Wenn in den Randbereichen vermehrt große Tröpfchen auftreten, können diese ansonsten übergewichtet werden und die resultierende Verteilung in der Folge fälschlicherweise hin zu größeren Durchmessern verschieben. Gerade bei dem Referenzspray sind im Vergleich zum Twinjetspray relativ betrachtet größere Randbereiche als Zentrum des Sprays in einer Ebene abgebildet. Daher werden die einzelnen Messpunkte in der Ebene gewichtet, um anschließend einen gemittelten und gewichteten

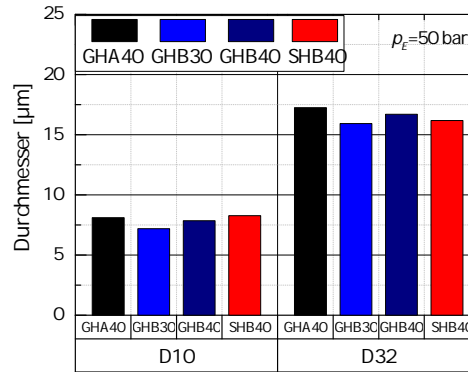


Abbildung 5.31: Durchmesser der Tröpfchengrößenverteilung mit der Anzahlkonzentration gewichtet. Die Messungen erfolgten mit einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, gemessen in einem Abstand von $z = 30$ mm von der Düsenspitze.

Durchmesser für ein Spray in einer Ebene zu bestimmen. Die Gewichtung des Messpunkts i erfolgt mittels folgender Gleichung

$$\eta_i = \frac{c_i}{\sum_{j=0}^{N-1} c_j}, \quad (5.2)$$

wobei c_i die Anzahlkonzentration am Punkt i darstellt.

Abbildung 5.31 zeigt die gewichtete Berechnung des arithmetischen mittleren Tröpfchendurchmessers und des Sauterdurchmessers in einem Abstand von $z = 30$ mm vom Düsenaustritt für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar. Die ermittelten Durchmesser der verschiedenen Spraytypen liegen alle in einem Größenbereich. Das Twinjetspray GHB30 weist von allen betrachteten Durchmessern den niedrigsten Wert auf, das Twinjetspray GHA40 den höchsten. Der ermittelte Sauterdurchmesser liegt für alle Sprays für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar bei ungefähr $16 \mu\text{m}$. Die Größenordnung passt zu den Werten, die in der Literatur zu finden sind, hier liegt der Sauterdurchmesser im Zentrum des Sprays in einem Abstand von $z = 30$ mm bei $12 \mu\text{m}$. In den Randbereichen steigt dieser zum Teil bis auf $18 \mu\text{m}$ an [34].

Abbildung 5.32 zeigt den gewichteten mittleren arithmetischen Tröpfchendurchmesser und den Sauterdurchmesser für höhere Einspritzdrücke von 100 bar und 200 bar. Hier fällt zunächst der erwartete Trend, mit ansteigendem Druck werden die Tröpfchen kleiner, auf. Auch für die höheren Einspritzdrücke liegen die ermittelten Durchmesser für die verschiedenen Sprays in einem Größenbereich, wobei auch hier das Twinjetspray GHA40 die Tröpfchen mit den größten Durchmessern produziert. Die Tröpfchengröße nimmt im Nahbereich der Düse mit der Entfernung immer weiter ab. Sobald der Sekundärzerfall abgeschlossen ist, folgt der umgekehrte Trend der größeren Tröpfchen bei größerer Reichweite.

In Abbildung 5.33 ist die kumulierte Häufigkeit für den arithmetisch gemittelten Durchmesser d_{10} (links) und für den Sauterdurchmesser (rechts) abgebildet. Es wird deutlich, dass der Verlauf der kumulierten Häufigkeit für die Referenzdüse zu größeren Tröpfchendurchmessern verschoben ist. Außerdem ist die Steigung der Kurve geringer, was für eine schärfere Trennung bei den Twinjetprays spricht. Die Tröpfchendurchmesser sind auf einen geringeren Größenbereich verteilt. Tröpfchen mit einem Durchmesser ($d_{10} \geq 30 \mu\text{m}$) existieren für den arithmetisch gemittelten

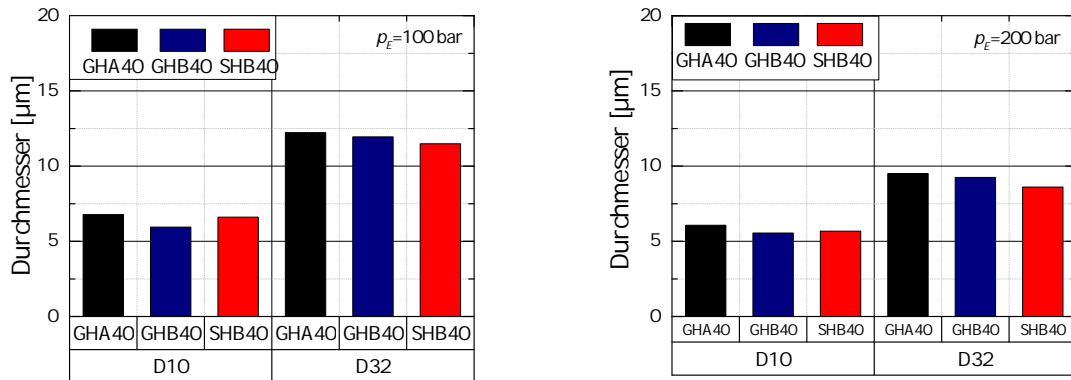


Abbildung 5.32: Mit der Anzahlkonzentration gewichtete Durchmesser der Tröpfchengrößenverteilung für einen Einspritzdruck von $p_E = 100 \text{ bar}$ links und $p_E = 200 \text{ bar}$ rechts, gemessen in einem Abstand von $z = 30 \text{ mm}$ von der Düsen Spitze

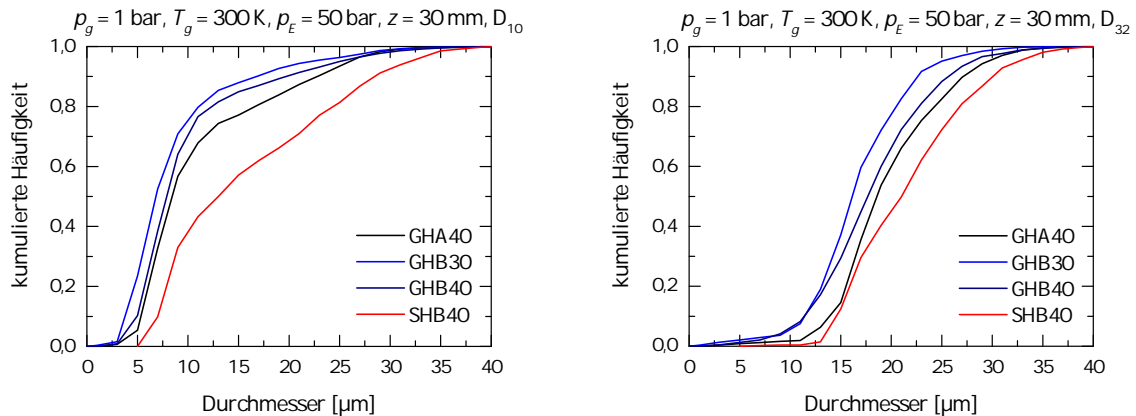


Abbildung 5.33: Kumulierte Häufigkeit der Tröpfchengrößenanzahl für einen Einspritzdruck für $p_E = 50 \text{ bar}$ links für den arithmetisch gemittelten Durchmesser und rechts für den Sauter-durchmesser, gemessen in einem Abstand von $z = 30 \text{ mm}$ von der Düsen Spitze

Durchmesser für die Twinjetsprays nicht mehr. Die ganz kleinen Tröpfchen ($d_{10} \leq 50 \mu\text{m}$) hingegen können nur für die Twinjetsprays detektiert werden. Die Kurven liegen für die Twinjetsprays nah beieinander, mit dem für GHB30 am weitesten zu niedrigen Tröpfchendurchmessern verschobenen Verlauf.

Alternativ zur graphischen Darstellung der kumulierten Häufigkeit werden die Tröpfchengrößen für die verschiedenen Einspritzdrücke anhand des Durchmessers d_{95} in Tabelle 5.3 angegeben. 95% der Gesamtanzahl der Tröpfchen sind kleiner gleich dem angegebenen Tröpfchendurchmesser. Dieser charakteristische Tröpfchendurchmesser ist für Verdampfungsprozesse von entscheidender Bedeutung. Der Durchmesser ist ein Maß für die größeren Tröpfchen in der Probe. Es ist der numerische Durchmesser angegeben, der sich auf die Anzahl der Tröpfchen bezieht. Es wird deutlich, dass der Äquivalentdurchmesser d_{95} für alle drei betrachteten Einspritzdrücke für die Referenzdüse deutlich höher liegt als für die Twinjetdüsen. Für das Referenzspray entstehen mehr Tröpfchen mit größerem Durchmesser als für die Twinjetsprays.

p_E [bar]	Durchmesser d_{95} [μm]			
	GHA40	GHB30	GHB40	SHB40
50	29,7	25,0	28,0	32,6
100	19,9	-	16,7	26,9
200	14,0	-	15,9	18,0

Tabelle 5.3: Äquivalentdurchmesser d_{95} in einem Abstand von $z = 30$ mm von der Düse für den Sauter-durchmesser für die verschiedenen Einspritzdrücke p_E

5.7.5 Korrelation

Der Abschnitt soll klären, ob zwischen gemessener Geschwindigkeit und Tröpfchengröße eine Abhängigkeit besteht. In Abbildung 5.34 ist die Tröpfchengrößenverteilung für das Zentrum des Sprays aus Spritzloch 1 der vier verschiedenen Spraytypen für den stationären Bereich von 1 – 2 ms dargestellt. Die Verteilung im Zentrum entspricht grundsätzlich der des gesamten Sprays: für die Twinjetsprays liegt die Verteilung bei etwas kleineren Tröpfchen als für das Referenzspray. Der am häufigsten detektierte Tröpfchendurchmesser liegt für alle vier Sprayarten bei $D_{10} = 4 \mu\text{m}$. Für die Twinjetsprays ist der Abfall der Anzahl hin zu größeren Tröpfchen stärker als bei dem Referenzspray SHB40. Die ermittelte axiale Geschwindigkeitskomponente ist für die Referenzdüse höher und steigt mit steigendem Durchmesser leicht an. Dieser Trend kann sowohl für die Twinjetsprays als auch für die Referenzdüse gefunden werden. Die ermittelte Geschwindigkeit der Referenzdüse stimmt mit der aus der Literatur für einen Mehrlochinjektor gut überein. Auch für diesen liegen die ermittelten Geschwindigkeiten in einem Abstand von $z = 30$ mm im Bereich von 70 m/s. In diesen Messungen kann ebenfalls eine leichte Korrelation zwischen Tröpfchengröße und Geschwindigkeit festgestellt werden [34].

Da die Sprays keine ausgeprägte Durchmesser-Geschwindigkeitskorrelation aufweisen und diese für alle betrachteten Sprays ähnlich ist, erfolgt die Mittelung integral über Tröpfchen aller Durchmesser. Zusätzlich zur Geschwindigkeit der Tröpfchen ist ihre ermittelte Standardabweichung als Fläche dahinter dargestellt. Diese liegt für alle Sprays im Bereich von ± 15 m/s. Im Spray bewegen sich demnach die Tröpfchen der unterschiedlichen Größenklassen ähnlich schnell, für die größeren Tröpfchen können leicht erhöhte Geschwindigkeiten detektiert werden. Durch die Gewichtung mittels transit time wurde der Fehler durch den *velocity bias* vermieden.

5.7.6 Tröpfchengrößenverteilung in der Gesamtbetrachtung

Mit steigendem Einspritzdruck nimmt die Qualität der mittels Phasen-Doppler-Messtechnik ermittelten Daten ab. Bei hohen Einspritzdrücken von $p_E = 200$ bar ist die erfassbare Datenrate während der Einspritzung gering, zum Teil zu niedrig, um sinnvoll Werte evaluieren zu können. Für die niedrigeren Einspritzdrücke, vor allem für einen Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar, ist eine hohe Datenrate, auch im Zeitraum während der Einspritzung im Zentrum des Sprays, realisierbar. Bei niedrigen Einspritzdrücken von $p_E = 20$ bar entstehen durch die Kollision hauptsächlich Ligamente und keine sphärischen Tröpfchen, sodass eine Bestimmung des Tröpfchendurchmessers nicht möglich ist, da die Technik auf sphärische Tröpfchen limitiert ist. Bei den hohen Einspritzdrücken von $p_E = 200$ bar haben die Messungen in einem Abstand von $z = 50$ mm für die SHB40 Düse eine deutlich höhere Datenrate, vor allem im Zeitraum während der Einspritzung.

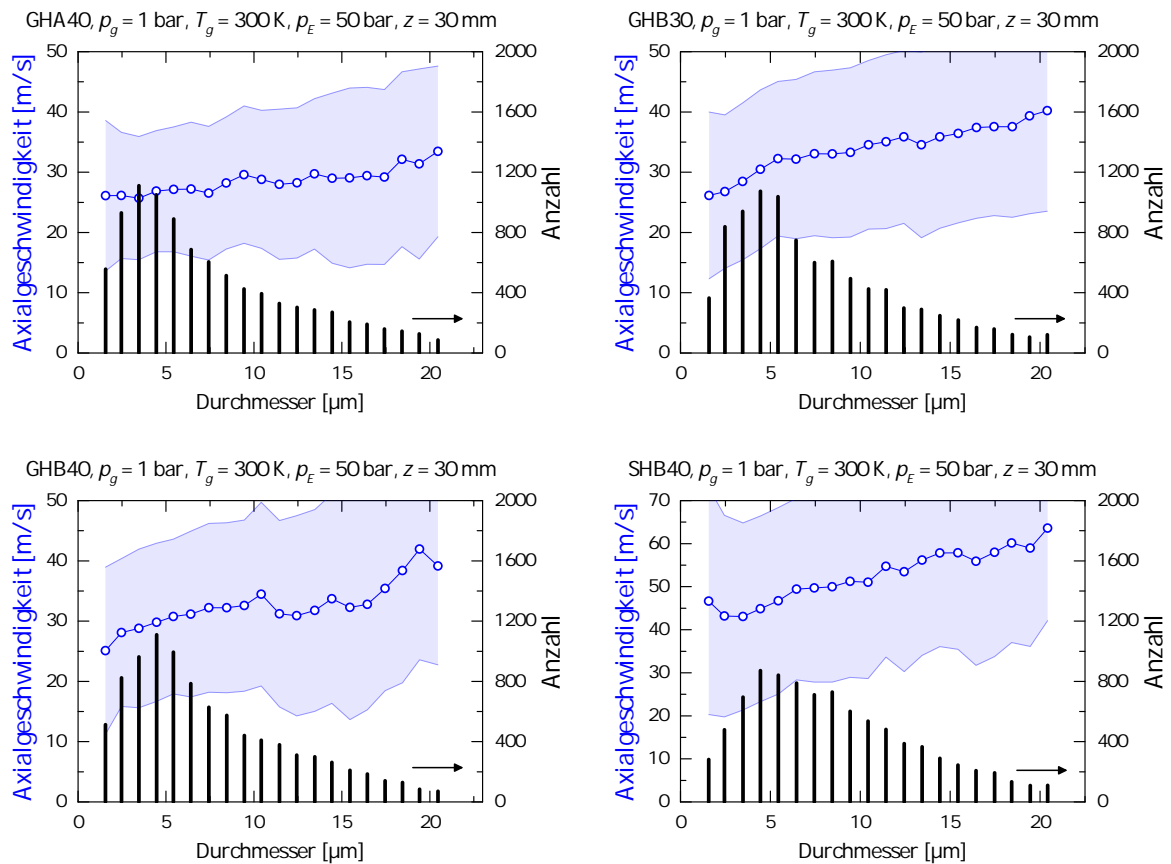


Abbildung 5.34: Tröpfchengrößenverteilung und mittlere axiale Geschwindigkeitskomponente mit Standardabweichung, dargestellt als blaue Fläche, der vier betrachteten Sprays bei einem Düsenabstand von $z = 30 \text{ mm}$ und einem Einspritzdruck von $p_E = 50 \text{ bar}$

Die Messungen der Tröpfchengrößen und -geschwindigkeiten können wegen der optischen Zugänglichkeit erst in einem Abstand von $z = 30 \text{ mm}$ von der Düsen Spitze durchgeführt werden. Erst in diesem Abstand ist das Spray optisch ausreichend durchlässig, sodass eine Phasen-Doppler-Messung möglich ist. Bei hohen Einspritzdrücken ist der größere Abstand von $z = 50 \text{ mm}$ vorteilhaft, hier ist die Penetration der Twinjetsprays allerdings nicht ausreichend, die Datenrate für die Twinjetsprays ist dort deshalb auch gering.

Die korrekte Auswertung, Mittelung und Gewichtung der großen entstehenden Datenmengen, die mittels Phasen-Doppler-Messungen über einer kompletten Ebene generiert werden, ist unumgänglich. Durch die Reduzierung auf aussagekräftige Größen, wie den gewichteten Sauterdurchmesser D_{32} , können die Messungen der Tröpfchengröße für die verschiedenen Spraytypen verglichen werden.

5.8 Zusammenfassung und Fazit

Mit verschiedenen optischen Messtechniken ist das Zerstäubungskonzept der Kollision zweier Kraftstoffjets im Düsenabereich untersucht worden. Mit diesen Messungen werden neben dem

physikalischen Verständnisgewinn auch detaillierte Vergleichsdaten für die numerische Berechnung der Kollision zweier Kraftstoffsprays bereitgestellt.

Durch die geometrische Charakterisierung wird zunächst ein erster Überblick über das entstehende Spray gewonnen. Das entstehende Blatt hat bei niedrigen Einspritzdrücken keine intakte Oberfläche, sondern besteht aus Ligamenten und Tröpfchen. Im Falle hoher Einspritzdrücke sind durch den dichten Spraynebel keine Ligamente mehr identifizierbar. Falls noch welche existieren, befinden sich diese im nicht einsehbaren Zentrum des Sprays. Die schmale Seite des Blatts ist deutlich breiter als für ein laminares Blatt zu erwarten wäre. Die geometrische Charakterisierung wird durch Kegelwinkel, Flüssigkeitsreichweite und die Dauer bis zur Verdampfung unter motorähnlichen Bedingungen ergänzt. Twinjetsprays weisen unter kalten und verdampfenden Bedingungen einen deutlich größeren Kegelwinkel als das konventionelle Referenzspray auf. Für die Twinjetdüsen wird die doppelte Menge an Kraftstoff eingespritzt. Die Flüssigkeitsreichweite ist für die Twinjetsprays deutlich geringer, der Einfluss des Kollisionswinkel ist gut zu sehen. Im Vergleich zum Referenzspray verteilt sich das Twinjetspray auf kürzerer Strecke weiter im Raum. Diese weitere Verteilung sorgt dafür, dass in gleicher Zeit doppelt so viel Menge an Kraftstoff für die Twinjetsprays verdampft werden kann.

Die positiven Auswirkungen der Twinjetzerstäubung auf die Gemieschbildung werden durch die Airentrainmentuntersuchungen bestätigt. Die sprayinduzierte Airentrainmentgeschwindigkeit in ein Twinjetspray ist bei gleichem Einspritzdruck deutlich höher als in ein Referenzspray. Die Strömung, die bei einem Twinjetspray für 50 bar Einspritzdruck induziert wird, entspricht der, für die das Referenzspray Einspritzdrücke um die 150 bar benötigt. Sowohl für die Strömung, die in die lange, als auch für die, die in die schmale Seite der Lamelle fließt, können erhöhte Geschwindigkeitswerte festgestellt werden, die auf eine bessere Zerstäubung auf kürzerer Strecke hinweisen. Durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit vom Gas in das Spray kann auch bei motorähnlichen Bedingungen von einer schnelleren Verdampfung und somit einer besseren Gemischbildung ausgegangen werden. Die erhöhte Entrainmentgeschwindigkeit zeigt sich entlang des kompletten Sprays, sie ist im Nahbereich, kurz nach dem Kollisionspunkt, am höchsten. Die mittels Phasen-Doppler-Messtechnik gemessene Geschwindigkeit in einem Abstand von $z = 30$ mm zeigt die Geschwindigkeitsreduzierung innerhalb der Twinjetsprays durch die Kollision auf. Die Geschwindigkeitsverteilung in der Ebene unterscheidet sich von konventionellen Sprays, für Twinjetsprays gibt es kein ausgeprägtes Zentrum mit maximaler Geschwindigkeit. Das gesamte nach der Kollision ellipsenförmige Spray bewegt sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit. Bei konventionellen Sprays bildet sich im Zentrum des Sprays der Punkt höchster Geschwindigkeit aus. Twinjetsprays werden durch die Kollision abgebremst, daher ist ihre Geschwindigkeit im Vergleich zu der der Referenzdüse deutlich niedriger.

Die Hauptthese des Twinjetansatz, die Entstehung kleinerer Tröpfchen, wird mittels Phasen-Doppler-Messtechnik überprüft. Bei Gewichtung der Verteilung mit der Anzahlkonzentration pro Messpunkt kommt für die jeweils untersuchten Einspritzdrücke ein Gesamtsauterdurchmesser im gleichen Größenbereich für Twinjetspray und Referenzspray heraus. Die kleinsten Tröpfchen finden sich bei den Twinjetsprays am Rand der langen Seite der Ellipse, bei dem Referenzspray im Zentrum. Der Tröpfchendurchmesser ist über den zeitlichen Verlauf während der Einspritzung konstant, erst nach Ende der Einspritzung nimmt der Durchmesser der detektierten Tröpfchen ab. Die Datenrate ist stark von der optischen Dichte des Sprays und somit vom Einspritzdruck abhängig. Für hohe Einspritzdrücke kann während der Einspritzung keine ausreichend hohe Datenrate erreicht werden, um in einem Abstand von 30 mm aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen. In größerem Abstand von 50 mm sind auch bei höherem Einspritzdruck Messungen mit

ausreichender Datenrate möglich, allerdings ist die Penetration der Twinjetsprays nicht ausreichend, um diese in größerem Abstand zu untersuchen. Das betrachtete Zerstäubungskonzept der Kollision anstelle dem der Zerstäubung durch Druck birgt interessante Potentiale. Durch die Erhöhung des Airentrainments auf kürzerer Strecke mit einer engeren Tröpfchengrößenverteilung könnte das Zerstäubungskonzept zu Vorteilen bei der Gemischbildung führen. Die durch die Kollision um 30 % verringerte Flüssigkeitsreichweite der Twinjetsprays im Vergleich zur konventionellen Referenzdüse kann bei Problemen mit Wandbenetzung vorteilhaft sein. Durch die Kollision zusätzlich gewonnene Freiheitsgrade können genutzt werden, um das Spray im Motorraum mit angepasstem Düsendesign perfekt auslegen zu können. Die elliptische Form des Sprays mit einer gleichmäßigen und geringeren Geschwindigkeit kann hierfür hilfreich sein.

Eine hochpräzise Fertigung ist hierbei die Grundlage des Konzeptes der in kurzem Abstand von der Düse aufeinandertreffenden Flüssigkeitsjets. Das Öffnen von nur einem Spritzloch oder Nichtaufeinandertreffen der beiden einzelnen Jets kann im Motorraum zu gravierenden Problemen führen. Der gewünschte Effekt, dass mit einem Einspritzdruck von $p_E = 50$ bar ein Twinjetspray mit den gleichen Eigenschaften entsteht wie ein Referenzspray bei $p_E = 200$ bar, ist nur für das sprayinduzierte Airentainment gegeben. Die Tröpfchengrößen liegen für die Twinjetsprays nur leicht unter denen des Referenzsprays im Zentrum des Sprays. Bei Gewichtung der Verteilung mit der Anzahllichte Verteilung ergeben sich für die entsprechenden Einspritzdrücke Sauterdurchmesser im gleichen Größenbereich. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Zerstäubung und das Airentainment nicht die einzig wichtigen Indikatoren einer Einspritzung sind - ein zum Beispiel weiterer wichtiger Grund für den Trend zu hohen Einspritzdrücken ist die Notwendigkeit eines schnellen Kraftstoff-Luft Mischungsprozesses für den thermodynamisch sinnvollen Schichtbetrieb.

Durch die Untersuchung mittels der verschiedenen optischen Messtechniken kann ein Gesamtüberblick zur Kollision zweier Benzinjets im Nahbereich der Düse gegeben werden. Eine einzelne optische Messtechnik kann das Spray nicht komplett charakterisieren, durch das Zusammenspiel der verschiedenen optischen Messtechniken ist der Gesamtüberblick jedoch möglich. Durch die optischen Messungen an der Kammer konnten die Vorteile der Zerstäubung, Verdampfung und Gemischbildung der Twinjetsprays im Vergleich zu einem Referenzspray gezeigt werden. Diese Vorteile sind im Bereich des Airentrainments wie erhofft, die entstehenden Tröpfchengrößen für die beiden Sprays liegen jedoch im gleichen Bereich. Wie sich das Spray letztendlich im Motor verhält, können die Untersuchungen nur schwer voraussagen. Die verringerte Flüssigkeitsreichweite, das erhöhte Airentainment sowie die zusätzlich gewonnenen Freiheitsgrade durch die Kollision der beiden Einzeljets sind Vorteile im Vergleich zu dem konventionellen Spray, die jedoch bei Untersuchungen im Motor ihr Potential unter Beweis stellen müssen.

Eine sehr interessante Kernfrage ist, wie es sich zwischen Freiheitsgrad und Kontrolle verhält. Es sollte gewährleistet werden, dass keine Brennraumoberfläche nass wird, gleichzeitig soll die Geometrie möglichst optimal genutzt werden. Die Robustheit der Injektoren gegenüber einer intensiven Querströmung im Brennraum und wie die Sprays auf Flashboiling und erhöhte beziehungsweise reduzierte Gasdichte im Brennraum reagieren sind weitere, zu klärende Punkte. Des Weiteren ist zu prüfen, ob eine Ausführung mit Vorstufen sinnvoll ist und inwieweit kurze Spritzlöcher die Kontrolle über das Spray verringern. Wie wirken sich Ablagerungen nach längerer Verwendung im Motor aus? Können diese zum Beispiel das saubere Aufeinandertreffen der Twinjets beeinträchtigen?

Zusammenfassung und Ausblick

Inhalt dieser Arbeit sind Untersuchungen interagierender Sprays mit Hilfe experimenteller Messtechniken an stationären Kammern. Darunter fällt die Betrachtung der physikalischen Wirkmechanismen ebenso wie der Gewinn von Validierungsdaten für die Simulation, um abschließend einschätzen zu können, ob die Interaktion von Sprays Vorteile im Vergleich zu den konventionellen, etablierten Methoden der motorischen Gemischbildung bieten kann.

6.1 Zusammenfassung

Messtechniken Interagierende Sprays stellen eine Möglichkeit der Zerstäubung von Kraftstoffsprays dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen mit verschiedenen Spraymesstechniken durchgeführt, um die Interaktionsmechanismen genauer zu untersuchen: Um eine gute optische Zugänglichkeit zu garantieren, wurden für beide Konzepte Drei-Loch bzw. Drei-Loch-Paar-Düsen gefertigt. Diese ermöglichen fast uneingeschränkte optische Zugänglichkeit bei minimaler Beeinflussung der Düseninnenströmung und damit des Sprays im Vergleich zu einem motortauglichen Injektor. Zur Charakterisierung der Sprays, sowohl bei umgebenden als auch bei motorähnlichen Randbedingungen, wurden Hochgeschwindigkeits- und hochauflösende Streulicht-, Schatten- und Schlierenaufnahmen durchgeführt und ausgewertet. Die Verdampfung und die Geschwindigkeit des Sprays konnten ebenfalls mit Hilfe dieser Messtechniken abgeschätzt werden. Das Airentrainement in die Sprays wurde mittels (F)PIV-Messtechnik untersucht. Um näher an die Interaktionszone zu gelangen, wurde das konventionelle PIV zu FPIV weiterentwickelt. Zudem wurde Hochgeschwindigkeits-PIV unter motorähnlichen Bedingungen an der Brennkammer realisiert. Die Tröpfchengrößenverteilung der Benzinsprays konnte mit der PD-Messtechnik ermittelt werden. Im optisch dichteren Dieselspray wurde die Strahlkraftmesstechnik genutzt, um die Impulsverteilung der gruppierten Lochdüse in verschiedenen Abständen zum Düsenaustritt zu bestimmen. Die beiden Einzelsprays der gruppierten Lochdüse können mittels Strahlkraftmesstechnik einzeln aufgelöst werden. Um dies zu ermöglichen, wurde für die Strahlkraftmessungen auf einen sehr kleinen, räumlich hochauflösendem Sensor gesetzt.

All diese Messtechniken tragen dazu bei, ein einheitliches Bild zu interagierenden Sprays zu vermitteln. Insgesamt eignen sich die verwendeten Messtechniken, um ein Grundverständnis zur Interaktion von Kraftstoffsprays aufzubauen. Sie gelangen aber durch die hohe optische Dichte der Sprays, vor allem bei Dieselsprays, insbesondere im Nahbereich, an ihre Grenzen. Nur durch die Kombination verschiedener Messtechniken kann ein vollständiges Bild entstehen.

Interagierende Sprays Die Veränderung der Zerstäubung durch die Wechselwirkung zwischen zwei Kraftstoffsprays anstelle eines konventionellen Sprays wird in dieser Arbeit anhand zweier Konzepte untersucht. Unterschiedliche Interaktionsmechanismen werden für die beiden Kraftstoffe Benzin und Diesel in Betracht gezogen, da sich die Anforderungen für die Sprays in den jeweiligen Brennverfahren deutlich unterscheiden. Für den Dieselmotor wird das Konzept der fast parallelen Sprays betrachtet, für den Benzinmotor die Kollision zweier Kraftstoffjets im Nahbereich der Düse. Durch die Kollision wird die Art der Zerstäubung verändert und die Druckzerstäubung durch die Kollision zusätzlich unterstützt. Die Fertigung der Düsen mit interagierenden Sprays wird durch die doppelte Anzahl an Spritzlöchern aufwändiger und muss vor allem für das Konzept der Kollision sehr präzise sein.

Fast parallele Sprays Das erste betrachtete Konzept ist das der fast parallelen, interagierenden Sprays, das mit der gruppierten Lochdüse in der Dieseleinspritzung verwendet wird. Bei dem Konzept werden Düsen genutzt, die an einer Position statt einem Spritzloch mit großem Durchfluss Spritzlochpaare mit kleineren Spritzlochdurchmessern besitzen, deren Achsen leicht aufeinander zugeneigt sind und die insgesamt den gleichen hydraulischen Durchfluss wie das konventionelle, größere Spritzloch aufweisen. Es wurde erwartet, dass auf diese Weise der Vorteil der kleinen Spritzlöcher bei Teillast zur verbesserten Zerstäubung genutzt werden kann, ohne dabei auf die Fähigkeit großer Spritzlöcher, viel Kraftstoff bei Volllast im gesamten Brennraum zu verteilen, zu verzichten.

Im Vergleich zu einem konventionellen Spray mit gleichem hydraulischem Durchfluss zeigt das Spray der gruppierten Lochdüse kaum Unterschiede. Der Kegelwinkel und die Penetration des Sprays liegen im gleichen Größenbereich. Das Verdampfungsverhalten sowie das Entrainment sind ähnlich, was dafür spricht, dass vor allem der hydraulische Durchfluss und nicht die Tröpfchengröße für diese Größen entscheidend ist oder dass die Tröpfchen gar nicht kleiner sind. Eine direkte Überprüfung dieser letzten Annahme ist im Nahbereich aufgrund der sehr hohen optischen Dichte nicht zweifelsfrei möglich. Im Nahbereich der Düse, wo die beiden Einzelsprays noch separiert werden können, kann für die gruppierte Lochdüse ein leicht erhöhtes Entrainment festgestellt werden. Hierbei muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass das Entrainment nur in einer Halbebene gemessen wurde. Der Impuls des gruppierten Sprays verteilt sich ungleichmäßig auf die beiden Spritzlöcher, im Bereich der Sitzlochdüse zeigt sich ein deutlich stärkerer Impuls. Prinzipiell können Unterschiede in der Zerstäubung und Ausbreitung der Sprays der beiden Lochreihen festgestellt werden. Der Ursprung liegt allerdings nicht in den gruppierten Lochdüsen, sondern an der unterschiedlichen Innenströmung der beiden Düsenarten im Allgemeinen. Ein Vorteil der gruppierten Lochdüse ist, dass das Spray bei Penetration und Kegelwinkel deutlich weniger Schuss-zu-Schuss-Schwankungen aufweist als das Sacklochreferenzspray mit gleichem hydraulischem Durchfluss. Der Kegelwinkel ist für die gruppierte Lochdüse schmäler. Für die Tröpfchengröße liegen durch die Messmethoden nur sehr indirekte Hinweise vor.

Durch das Konzept der fast parallelen interagierenden Dieselsprays kann der erhoffte Vorteil eines erhöhten Entrainments und einer verbesserten Verdampfung nicht bestätigt werden. Die Stabilisierung des Sprays durch zwei Einzelsprays kann hingegen für die Auslegung weiterer Düsen genutzt werden. Die unterschiedliche Impulsausprägung des Sitz- und Sacklochsprays, bei Anordnung beider Löcher übereinander, zeigt den Einfluss der Innenströmung auf die Ausbildung der Einspritzstrahlen.

Kollidierende Sprays Die konventionelle Zerstäubung von Benzinsprays wird durch das Konzept der Prallzerstäubung der Flüssigkeitsjets in kurzem Abstand vom Düsenaustritt verändert. Intakte Flüssigkeitszylinder oder -lamellen sind inhärent instabil. Die beiden Flüssigkeitsjets zerstäuben, da Instabilitäten wachsen. Der Druck bzw. der Massenstrom sorgen dafür, dass dies schnell passiert und die Geschwindigkeitsdifferenz zur Umgebungsluft kann für eine weitere Verstärkung der Instabilität sorgen. Was hier - neben der Turbulenz fördernden starken Umlenkung bei Kollision - idealerweise auch passiert, ist, dass zwei Zylinder des Durchmessers d durch eine Lamelle mit der Dicke $\ll d$ ersetzt werden. Dies ist die primäre Ursache für die vermutet kleineren Tröpfchen. Die Penetration nimmt ab und der Kegelwinkel des Sprays wird größer. Je nach Kollisionswinkel zwischen den beiden Jets kann ein unterschiedliches Spraybild erzeugt werden. So können zusätzliche Freiheitsgrade gewonnen und die Gemischbildung neu gestaltet werden. Bei den untersuchten Düsen schließen die beiden Jets einen Winkel von $\theta = 30^\circ$ bzw. 40° ein. So kann eine Zerstäubung garantiert werden, die kleine Tröpfchen entstehen lässt, bei der aber trotzdem noch genug Impuls nach vorne existiert, um das Spray im Brennraum zu verteilen. Trotz der Kollision im Nahbereich wurden keine Rückspritzer auf die Kuppe identifiziert.

Nach der Arbeit von Durst [29] wurde erwartet, dass hierdurch bei Einspritzdrücken von weniger als 100 bar die gleiche Zerstäubungswirkung erzielt werden kann, wie dies bei konventionellen Düsen erst bei wesentlich höheren Einspritzdrücken (200 – 250 bar) möglich ist. Um dies zu beurteilen, wurden neben der geometrischen Charakterisierung der kollidierenden Benzinsprays das Verdampfungsverhalten, das Airentrainment und die Tröpfchengrößenverteilung der Twinjetsprays und eines konventionellen Referenzsprays untersucht.

Dadurch, dass sich Twinjetsprays durch die Kollision der beiden Einzeljets breiter im Raum verteilen, ist die Penetration verkürzt. Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich das Spray der Twinjetdüse sowohl im Verdampfungsverhalten als auch im Airentrainment von dem Verhalten der konventionellen Düse unterscheidet. Durch die Kollision der beiden Jets kann etwa die doppelte Menge an Kraftstoff in der gleichen Zeit verdampft werden, die Flüssigkeitsreichweite der Twinjetsprays ist geringer als die des Referenzsprays. Das Airentrainment ist bei den Twinjetsprays konsequenterweise auch höher. Im Nahbereich der Düse kann mit Hilfe der Twinjetdüse ein Entrainment bei einem Einspritzdruck von 50 bar erreicht werden, für das bei der konventionellen Düse ein Einspritzdruck von ca. 150 bar erforderlich wäre. Somit kann in diesem Bereich die These von Durst bestätigt werden. Die Sauterdurchmesser der Tröpfchengrößenverteilung für Twinjetspray und Referenzspray liegen für eine betrachtete Ebene im Abstand von $z = 30 \text{ mm}$ im gleichen Bereich. Durch die Kollision wird vor allem die Ausbreitung des Sprays im Raum verändert. Durch die weitere Verteilung wird mehr Luft in das Spray gezogen und somit die Verdampfung beschleunigt. Ein größerer Kollisionswinkel erhöht das Airentrainment und verringert die Flüssigkeitsreichweite. Im Verdampfungsverhalten kann aufgrund unterschiedlicher Kollisionswinkel allerdings kein Unterschied festgestellt werden. Die Anordnung der Spritzlöcher hat Einfluss auf die Zerstäubung. Quantitativ ist dies allerdings schwierig zu beurteilen, da durch die unterschiedliche Anordnung verschiedene Seiten der entstehenden Lamelle betrachtet werden. Insgesamt ist die Zerstäubung mittels Kollision ein vielversprechendes Konzept, da Airentrainment und Verdampfung verbessert werden können. Der erhoffte Effekt auf die Tröpfchengröße konnte nicht bestätigt werden, durch die andere Verteilung im Raum können Twinjetsprays aber trotzdem einen erheblichen Vorteil im Spraytargeting bieten.

Möglichkeiten und Grenzen der untersuchten Konzepte Ob die untersuchten Injektorkonzepte auch in der Serie verwendet werden können, hängt wesentlich von der Fertigung der Düsen ab. In

der Arbeit wurden Grundlagen zur Spray-Spray-Interaktion an stationären Kammern untersucht, die Injektoren allerdings nicht in ihrer eigentlichen Verwendung im Motor getestet. Um den Einsatz von interagierenden Kraftstoffsprays abschließend beurteilen zu können, müssen hierzu zusätzlich Untersuchungen am Motor durchgeführt werden. In den Untersuchungen wurden zur besseren optischen Zugänglichkeit Drei-Loch-Düsen verwendet, die durch die geringere Anzahl an Spritzlöchern nicht den Durchfluss darstellen können, der im Motor vor allem bei Volllast benötigt wird. Durch die Dreilochdüsen kann trotz geringerer Lochanzahl eine realistische Innenströmung für die Sprays abgebildet werden [69], vor allem wird aber eine fast uneingeschränkte optische Zugänglichkeit ermöglicht. Im Vergleich zu einer konventionellen Düse unterscheidet sich die Innenströmung für das Dieselspray dennoch. Die Querströmungsanteile werden mit höherer Anzahl der Spritzlöcher geringer und die einzelnen Sprays somit auch stabiler. Hier käme besonders für die Twinjetsprays zum Tragen, dass man das Targeting im Grunde neu lernen müsste.

Die untersuchten Düsen waren erste Versuche, die vorgeschlagenen Konzepte zu realisieren und das Konzept der Interaktion zu betrachten. Die optimale Düsengeometrie ist vom jeweiligen Brennraum abhängig. Die Düsengeometrie muss schließlich für den optimalen Einsatz an die geometrischen Anforderungen des jeweiligen Brennraumkonzepts angepasst werden. Vor allem für den Benzin-Brennraum wäre zu erwarten, dass mehrere Targeting-Iterationen erforderlich wären, bevor eine brauchbare Variante in einem bestimmten Motor steht.

6.2 Ausblick

Da die betrachteten interagierenden Sprays allesamt eine komplexe dreidimensionale Struktur besitzen, die sich nicht durch rotationssymmetrische Näherung approximieren lässt, ist zur Beschreibung des gesamten Sprays die Ergänzung durch die Simulation sehr sinnvoll. Insbesondere bei der gruppierten Lochdüse wäre eine Simulation der Innenströmung, die Aufschluss über das unterschiedliche Anströmen der Spritzlöcher geben kann, sehr interessant. Mit Hilfe der Simulation und den dargestellten Ergebnissen ließen sich neue, verbesserte Düsenlayouts auslegen und auch simulationsbasiert optimieren. Vorstellbar wäre die Anordnung der Spritzlöcher der gruppierten Lochdüse auf einem Lochkreis, sodass die unterschiedlichen Anströmungseffekte vermieden werden könnten. Da die betrachteten interagierenden Sprays jeweils nur eine mögliche Interaktionsform darstellen, ist es schwierig, eine allgemeine Aussage zu treffen. Die geringere Penetration und schnellere Gemischbildung für Twinjetsprays wurde im Rahmen der Arbeit aufgezeigt und verspricht Potential für den Motor. Wie sich die interagierenden Sprays schlussendlich im Motor verhalten, muss in zusätzlichen Versuchen direkt am Motor betrachtet werden. Abschließend kann festgehalten werden, dass es für neue Injektorkonzepte schwierig ist, die ausgereifte und über Jahre erforschte Technik der Einspritzung zu revolutionieren.

Das Konzept der gruppierten Dieseldüse ist derzeit ohne Einschränkungen bereit für den Motor. Neben der seitlichen Anordnung sind naheliegende Fragen, ob die *Interaktion* zu früh stattgefunden hat und ob ein größerer Winkel oder Abstand zwischen den beiden Spritzlöchern vorteilhaft wäre. Hat eine stärkere Trennung Vorteile, die zum Beispiel durch größere Gruppen noch kleinerer Spritzlöcher gestärkt werden können? Eine Untersuchung des Airentrainments in der orthogonal zu der bereits untersuchten verlaufenden Ebene ist ebenfalls von Interesse. Hier ist eventuell ein größerer Unterschied im Airentrainment zwischen gruppierter und konventioneller Düse zu erwarten.

Zwei Effekte, denen in der Benzindirekteinspritzung heutzutage viel Aufmerksamkeit gewidmet wird, sind die Kuppenbenetzung sowie das Flashboiling¹. Das wirft die Frage auf, ob durch Verwendung der Twinjetsprays eines oder gar beide Probleme verringert werden können. Zudem muss für dieses Konzept geklärt werden, wie robust es sich verhält, wenn - wie heute üblich - Vorstufen verwendet werden und asymmetrische Lochlayouts zum Einsatz kommen. Bei diesem Konzept ist im Gegensatz zum Konzept der gruppierten Dieseldüse zusätzlich zu ermitteln, wie robust es sich gegenüber der Fertigungstoleranz verhält und ob beim Einsatz im Motor die entstehende Spraylamelle durch die Brennraumströmung gestört wird.

Bei Abbildung der interagierenden Sprays durch die Simulation steht die Frage im Raum, wie sehr ein gutes Primärzerfallsmodell benötigt wird und inwieweit dieses durch die experimentellen Daten initialisiert werden kann. Die Simulation der Kollision des Benzinsprays ist deutlich aufwändiger als das Vereinen der Dieselsprays. Um die Kollision der Benzinsprays abzubilden, bieten sich zwei radikal unterschiedliche Wege an. Einerseits kann der klassische Ansatz genutzt und die experimentellen Daten zur Initialisierung ab dem Kollisionspunkt verwendet werden. Das primäre Tröpfchengrößenspektrum und die Verteilung der Tröpfchen müssten dann vorgegeben werden. Dies käme als pragmatischer Weg für den Einsatz am Motor in Frage. Hier wäre ein sehr schnelles Rechnen möglich. Andererseits gibt es die Möglichkeit, die Physik mittels DNS, startend mit einem Primärzerfallsmodell, aufzulösen. Hierfür sind gute Modelle für die Phasengrenzen, gute Numerik, sehr feine Gitter ($\approx 1 \mu\text{m}$) und gut skalierbare Codes notwendig. Dieser Ansatz ist sehr aufwändig und teuer. Die thermodynamischen Übergänge bei heißen Bedingungen erschweren die Simulation. Für die fast parallelen Dieselsprays können die Sprays näherungsweise als Gasphase betrachtet werden. Es müssen keine Grenzschicht und somit keine scharfen Gradienten aufgelöst werden. [92]

¹Flashboiling bildet sich, wenn sich der Kraftstoff zum Zeitpunkt der Einspritzung im Bezug auf den umgebenden Brennraumdruck in einem überhitzten Zustand befindet. Mit zunehmender Überhitzung des Kraftstoffs steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die einzelnen Spraykeulen zu einem Hauptstrahl kollabieren.

Literaturverzeichnis

- [1] ADAM, A. ; LEICK, P. ; BITTLINGER, G. ; SCHULZ, C.: Visualization of the Evaporation of a Diesel Spray Using Combined Mie and Rayleigh Scattering Techniques. In: *Experiments in Fluids* 47 (2009), Nr. 3, S. 439–449
- [2] ALBRECHT, H.-E. ; DAMASCHKE, N. ; BORYS, M. ; TROPEA, C.: *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [3] ALEIFERIS, P. ; ASHRAFI-NIK, M. ; LADOMMATOS, N. ; DOBER, G. ; KARIMI, K.: A Study of Droplet Collision Modelling for Spray Formation and Mixing with a Two-Row Group-Hole Injection Nozzle for Diesel Engines. In: *Atomization and Sprays* 24 (2014), Nr. 12, S. 1089–1135
- [4] ANDERSON, E. A. ; SPALL, R. E.: Experimental and Numerical Investigation of Two-Dimensional Parallel Jets. In: *Journal of Fluids Engineering* 123 (2001), Nr. 2, S. 401–406
- [5] ANDERSON, W. ; RYAN, H. ; PAL, S. ; SANTORO, R.: Fundamental Studies of Impinging Liquid Jets. In: *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992
- [6] ARAI, M. ; SAITO, M.: Atomization Characteristics of Jet-to-Jet and Spray-to-Spray Impingement Systems. In: *Atomization and Sprays* 9 (1999), Nr. 4, S. 399–417
- [7] ARANEO, L. ; COGHE, A. ; BRUNELLO, G. ; COSSALI, G. E.: Experimental Investigation of Gas Density Effects on Diesel Spray Penetration and Entrainment. In: *SAE Technical Paper 1999-01-0525*, 1999
- [8] ARANEO, L. ; TROPEA, C.: Improving Phase Doppler Measurements in a Diesel Spray. In: *SAE Technical Paper 2000-01-2047*, 2000
- [9] ARBEAU, A. ; BAZILE, R. ; CHARNY, G. ; BEN, L. ; GASTALDI, P.: Application of PIV Technique and Use of Fluorescent Tracers to Direct Measurements of Air Entrainment in Diesel Sprays. (2004)
- [10] ARRÈGLE, J. ; PASTOR, J. V. ; RUIZ, S.: The Influence of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics. In: *SAE Technical Paper 1999-01-0200*, 1999
- [11] ASHGRIZ, N.: Impinging Jet Atomization. In: *Handbook of Atomization and Sprays*. Springer US, New York Dordrecht Heidelberg London, 2011, S. 685–707

-
- [12] BAILARDI, G. ; NEGRI, M. ; CIEZKI, H.: Several Aspects of the Atomization Behavior of Various Newtonian Fluids with a like-on-like Impinging Jet Injector. In: *23rd Annual conference on liquid atomization and spray systems (ILASS)*, Brno, Czech Republic, 2010
- [13] BASSHUYSEN, R. van: *Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung: Ottokraftstoffe, Erdgas, Methan, Wasserstoff*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2016
- [14] BELLAN, J. ; HARSTAD, K.: Analysis of the Convective Evaporation of Nondilute Clusters of Drops. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 30 (1987), Nr. 1, S. 125–136
- [15] BERGSTRAND, P. ; DENBRATT, I.: Diesel Combustion with Reduced Nozzle Orifice Diameter. In: *SAE Technical Paper 2001-01-2010*, 2001
- [16] BERROCAL, E. ; KRISTENSSON, E. ; HOTTENBACH, P. ; ALDÉN, M. ; GRÜNEFELD, G.: Quantitative Imaging of a Non-Combusting Diesel Spray Using Structured Laser Illumination Planar Imaging. In: *Applied Physics B* 109 (2012), Nr. 4, S. 683–694
- [17] BERROCAL, E. ; KRISTENSSON, E. ; RICHTER, M. ; LINNE, M. ; ALDÉN, M.: Application of Structured Illumination for Multiple Scattering Suppression in Planar Laser Imaging of Dense Sprays. In: *Optics Express* 16 (2008), Nr. 22, S. 17870–17881
- [18] BREMOND, N. ; VILLERMAUX, E.: Atomization by Jet Impact. In: *Journal of Fluid Mechanics* 549 (2006), S. 273–306
- [19] BRENN, G.: Droplet Collision. In: *Handbook of Atomization and Sprays*. Springer US, New York Dordrecht Heidelberg London, 2011, S. 157–181
- [20] BRENN, G. ; KALENDERSKI, S. ; IVANOV, I.: Investigation of the Stochastic Collisions of Drops Produced by Rayleigh Breakup of Two Laminar Liquid Jets. In: *Physics of Fluids (1994-present)* 9 (1997), S. 349–364
- [21] CHEN, X. ; MA, D. ; YANG, V. ; POPINET, S.: High-Fidelity Simulations of Impinging Jet Atomization. In: *Atomization and Sprays* 23 (2013), Nr. 12, S. 1079–1101
- [22] CHOO, Y.-J. ; KANG, B.-S.: The Velocity Distribution of the Liquid Sheet Formed by two Low-Speed Impinging Jets. In: *Physics of Fluids (1994-present)* 14 (2002), Nr. 2, S. 622–627
- [23] CRUA, C. ; DE SERCEY, G. ; GOLD, M. ; HEIKAL, M.: Image-Based Analysis of Evaporating Diesel Sprays in the Near-Nozzle Region. In: *Proceedings of the 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS)*. Chania, Greece, 2013
- [24] DAGEFOERDE, H. ; KIEFER, A. ; SAMENFINK, W. ; WIESE, W. ; KUFFERATH, A.: Requirements for Spray and Tip Design of a Multi-Hole Injector for DISI Engines. In: *Proceedings of ICLASS, Tainan* (2015)
- [25] DANKERS, S. ; GOTTHARDT, M. ; STENGLER, T. ; OHMSTEDE, G. ; HENTSCHEL, W.: Two-Phase PIV: Fuel-Spray Interaction with Surrounding Air. In: *Particle Image Velocimetry*. 2007 (Topics in Applied Physics 112), S. 333–343
- [26] DOMBROWSKI, N. ; HOOPER, P. C.: A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow. In: *Journal of Fluid Mechanics* 18 (1964), S. 392–400

- [27] DOMBROWSKI, N. ; JOHNS, W. R.: The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets. In: *Chemical Engineering Science* 18 (1963), Nr. 3, S. 203–214
- [28] DURST, F. ; HAN, Y.: Doppelstrahlsprays zur Verbesserung von Hochdruck-Dieselinjektorsystemen. In: *MTZ Motortech Z* 76 (2015), Nr. 7-8, S. 74–79
- [29] DURST, F. ; HAN, Y. ; HANDTMANN, A. ; ZEILMANN, M.: Experimental and Theoretical Investigations of Twin-Jets. In: *Proceedings of the 13th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS)*. Heidelberg, Germany, 2012
- [30] DURST, F. ; ZARE, M.: Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows. In: *Proceedings of the LDA Symposium, Copenhagen*, 1976, S. 403–429
- [31] ECKELMANN, Helmut: Optische Meßmethoden. In: *Einführung in die Strömungsmeßtechnik*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1997, S. 142–230
- [32] FAETH, G. M.: Evaporation and Combustion of Sprays. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 9 (1983), Nr. 1, S. 1–76
- [33] FALGOUT, Z. ; RAHM, M. ; SEDARSKY, D. ; LINNE, M.: Gas/fuel Jet Interfaces under High Pressures and Temperatures. In: *Fuel* 168 (2016), S. 14–21
- [34] FDIDA, N. ; BLAISOT, Jean-B. ; FLOCH, A. ; DECHAUME, D.: Drop-Size Measurement Techniques Applied to Gasoline Sprays. In: *Atomization and Sprays* 20 (2010), Nr. 2, S. 141–162
- [35] FISCHER, T. ; HARTUNG, I. ; LAFRENTZ, F. ; MAJER, C. ; SANDER, W.: Simulation des Hydraulischen Druckanstiegs-Analysators (HDA) zur Messung der Einspritzmasse / -rate von Common Rail Injektoren. In: TSCHÖKE, Helmut (Hrsg.): *9. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung 2014*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 53–70
- [36] FUJIMOTO, H. ; TANABE, H. ; KUNIYOSHI, H. ; SATO, G.: Investigation on the Characteristics of Diesel Spray: Shape of Multiple Diesel Sprays and Air Movement between Neighbouring Sprays. In: *Bulletin of JSME* 25 (1982), Nr. 200, S. 249–256
- [37] GANDHI, A. ; SHAKAL, J. ; MARKLE, L. ; HUNG, D. ; CUMMINGS, S. ; PARRISH, S. ; HARRINGTON, D. ; SAYAR, H. ; KRAMER, J. ; MEINHART, M. A.: A New Measurement Standard for the Characterization of Automotive Fuel Sprays. In: *ILASS-Americas 21st Annual Conference in Liquid Atomization and Spray Systems, Orlando, FL*, 2008
- [38] GAO, J. ; MATSUMOTO, Y. ; NAMBA, M. ; NISHIDA, K.: Group-Hole Nozzle Effects on Mixture Formation and In-Cylinder Combustion Processes in Direct-Injection Diesel Engines. In: *SAE Technical Paper 2007-01-4050*, 2007
- [39] GAO, J. ; PARK, S. W. ; WANG, Y. ; REITZ, R. D. ; MOON, S. ; NISHIDA, K.: Simulation and Analysis of Group-Hole Nozzle Sprays Using a Gas Jet Superposition Model. In: *Fuel* 89 (2010), Nr. 12, S. 3758–3772

-
- [40] GHASEMI, A. ; BARRON, R. ; BALACHANDAR, R.: Spray-to-Spray Collision Breakup of Ultra High Injection Pressure Diesel Fuel. In: *20th Annual conference of the CFD society of Canada, Canmore, AB*, 2012
- [41] GHASEMI, A. ; BARRON, R. M. ; BALACHANDAR, R.: Spray-Induced Air Motion in Single and Twin Ultra-High Injection Diesel Sprays. In: *Fuel* 121 (2014), S. 284–297
- [42] GOLDSWORTHY, L. ; BONG, C. ; BRANDNER, P. A.: Measurements of Diesel Spray Dynamics and the Influence of Fuel Viscosity Using PIV and Shadowgraphy. In: *Atomization and Sprays* 21 (2011), Nr. 2, S. 167–178
- [43] GRAMLICH, R. ; LEICK, P. ; KALETA, J. ; BOSSMEYER, T. ; LAMANNA, G. ; ROISMAN, I. V. ; TROPEA, C.: Experimental Investigations of the Near-Field of Twinjet Gasoline Sprays Using Detailed High-Speed Shadowgraphy and Particle Image Velocimetry. In: *Proceedings of the 18th international symposium on application of laser and imaging techniques to fluid mechanics*. Lisbon, Portugal, 2016
- [44] GRAMLICH, R. ; LEICK, P. ; KALETA, J. ; MILLER, A. ; BOSSMEYER, T. ; LAMANNA, G. ; SCHMIDT, D. ; ROISMAN, I. V. ; TROPEA, C.: Air Entrainment and Momentum Distribution in the Near Field of Diesel Sprays from Group Hole Nozzles. In: *Proceedings of the 27th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS)*. Brighton, UK, 2016
- [45] GRAMLICH, R. ; LEICK, P. ; ROISMAN, I. V. ; TROPEA, C.: Investigation of the Near-Field of Sprays from Group-Hole Nozzles under Evaporating Conditions. In: *Proceedings of the 13th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS)*. Tainan, Taiwan, 2015
- [46] HAN, Y. ; DURST, F. ; ZEILMANN, M.: High-Pressure-Driven Twin-Jet Sprays and their Properties. In: *Atomization and Sprays* 24 (2014), Nr. 5, S. 375–401
- [47] HIROYASU, H. ; ARAI, M.: Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines. In: *SAE Technical Paper 1990:900475*, 1990
- [48] ISHIKAWA, N. ; ZHANG, L.: Characteristics of Air-Entrainment in a Diesel Spray. In: *SAE Technical Paper 1999-01-0522*, 1999
- [49] JOHNSON, J. ; GE, H. ; NABER, J. ; LEE, S. ; KURTZ, E. ; ROBARGE, N.: Investigation of Key Mechanisms for Liquid Length Fluctuations in Transient Vaporizing Diesel Sprays. In: *SAE International Journal of Engines* 6 (2013), Nr. 2, S. 1202–1212
- [50] JOHNSON, J. ; NABER, J. ; LEE, S. ; KURTZ, E. ; ROBARGE, N. ; GE, H.: Investigation of Diesel Liquid Spray Penetration Fluctuations under Vaporizing Conditions. In: *SAE Technical Paper 2012-01-0455*, 2012
- [51] JOHNSON, J. ; NABER, J. ; TANG, M. ; TAYLOR, Z. ; YEAKLE, K. ; KURTZ, E. ; ROBARGE, N.: Investigation of the Impact of Impingement Distance on Momentum Flux Rate of Injection Measurements of a Diesel Injector. In: *SAE Technical Paper 2015-01-0933*, 2015
- [52] KALETA, J.: *PIV-Untersuchungen des Luftentrainments interagierender Kraftstoffsprays im Düsenbereich*. Universität Stuttgart, Masterthesis, 2015

- [53] KARAMI, R. ; ASHGRIZ, N.: Flashing Sprays. In: *Handbook of Atomization and Sprays*. Springer US, New York Dordrecht Heidelberg London, 2011, S. 233–254
- [54] KASTENGREN, A. ; POWELL, C. ; WANG, Y. ; IM, K. ; WANG, J.: X-Ray Radiography Measurements of Diesel Spray Structure at Engine-Like Ambient Density. In: *Atomization and Sprays* 19 (2009), Nr. 11, S. 1031–1044
- [55] KLEIN-DOUWEL, R. J. H. ; FRIJTERS, P. J. M. ; SOMERS, L. M. T. ; BOER, W. A. ; BAERT, R. S. G.: Macroscopic Diesel Fuel Spray Shadowgraphy Using High Speed Digital Imaging in a High Pressure Cell. In: *Fuel* 86 (2007), Nr. 12–13, S. 1994–2007
- [56] KUHNERT, S. ; WAGNER, U. ; SPICHER, U. ; HAAS, S. ; GABEL, K. ; KUTSCHERA, I.: Influence of Injection Nozzle Hole Diameter on Highly Premixed and Low Temperature Diesel Combustion and Full Load Behavior. In: *SAE Technical Paper 2010-01-2109*, 2010
- [57] KULL, E.: *Einfluss der Geometrie des Spritzlochs von Dieseleinspritzdüsen auf das Einspritzverhalten*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2003
- [58] LEFEBVRE, A.: Atomization and Sprays. In: *Combustion: An International Series Hemisphere Publishing Corporation, CRC Press*, 1988
- [59] LEICK, P.: *Quantitative Untersuchungen zum Einfluss von Düsengeometrie und Gasdichte auf den Primärzerfallsbereich von Dieselsprays*. TU Darmstadt, Dissertation, 2008
- [60] LEICK, P. ; GRZESZIK, R. ; ARNDT, S. ; WISSEL, S.: Suppression of Multiple Scattering Using Structured Light Sheets—A first Assessment for Diesel and Gasoline Spray Visualization. In: *24th Annual conference on liquid atomization and spray systems (ILASS)*. Estoril, Portugal, 2011
- [61] LEICK, P. ; KASTENGREN, A. ; LIU, Z. ; WANG, J. ; POWELL, C.: X-Ray Measurements of Mass Distributions in the Near-Nozzle Region of Sprays from Standard MultiHole Common-Rail Diesel Injection Systems. In: *11th triennial interantional annual conference on liquid atomization and spray systems (ICLASS)*. Vail, Colorado USA, 2009
- [62] LIPPERT, A. M. ; REITZ, R. D.: Modeling of Multicomponent Fuels Using Continuous Distributions with Application to Droplet Evaporation and Sprays. In: *SAE Technical Paper 1997:972882*, 1997
- [63] MANIN, J. ; BARDI, M. ; PICKETT, L. M. ; DAHMS, R. N. ; OEFELEIN, J. C.: Microscopic Investigation of the Atomization and Mixing Processes of Diesel Sprays Injected into High Pressure and Temperature Environments. In: *Fuel* 134 (2014), S. 531–543
- [64] MATSUMOTO, A. ; XIE, X. ; LAI, M.-C. ; WINSOR, R. E. ; HUYNH, T. C.: Characterization of Diesel Common Rail Spray Behavior for Single- and Double-Hole Nozzles. In: *SAE International Journal of Engines* 1 (2008), Nr. 1, S. 1144–1156
- [65] MCCARTHY, M. J. ; MOLLOY, N. A.: Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design. In: *The Chemical Engineering Journal* 7 (1974), Nr. 1, S. 1–20
- [66] McLAUGHLIN, D. K. ; TIEDERMAN, W. G.: Biasing Correction for Individual Realization of Laser Anemometer Measurements in Turbulent Flows. In: *Physics of Fluids (1958-1988)* 16 (1973), Nr. 12, S. 2082–2088

-
- [67] MEIER, G. E. A. ; LOOSE, S. ; STASICI, B.: Unsteady liquid jets. In: *Applied Scientific Research* 58 (1997), S. 207–216
- [68] MILLER, A.: *Experimentelle Untersuchungen von gruppierten Dieselsprays mittels Strahlkraft und Strahlbild im Nahbereich der Düse*. Universität Stuttgart, Masterthesis, 2016
- [69] MOON, S. ; GAO, Y. ; PARK, S. ; WANG, J. ; KURIMOTO, N. ; NISHIJIMA, Y.: Effect of the Number and Position of Nozzle Holes on In- and Near-Nozzle Dynamic Characteristics of Diesel Injection. In: *Fuel* 150 (2015), S. 112–122
- [70] MOON, S. ; MATSUMOTO, Y. ; NISHIDA, K. ; GAO, J.: Gas Entrainment Characteristics of Diesel Spray Injected by a Group-Hole Nozzle. In: *Fuel* 89 (2010), Nr. 11, S. 3287–3299
- [71] NABER, J. ; SIEBERS, D. L.: Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays. In: *SAE Technical Paper 96-0034*, 1996
- [72] OHNESORGE, W. von: Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen. In: *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 16 (1936), Nr. 6, S. 355–358
- [73] PALAO, J. O. S.: *Modellierung des Einflusses der Düsenströmung auf den Zerfall von Dieselstrahlen*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2009
- [74] PANÃO, M. ; MOREIRA, A. ; DURÃO, D.: Transient Analysis of Intermittent Multijet Sprays. In: *Experiments in Fluids* 53 (2011), Nr. 1, S. 105–119
- [75] PARK, S. W. ; REITZ, R. D.: A Gas Jet Superposition Model for CFD Modeling of Group-Hole Nozzle Sprays. In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30 (2009), Nr. 6, S. 1193–1201
- [76] PARK, S. W. ; REITZ, R. D.: Optimization of Fuel/Air Mixture Formation for Stoichiometric Diesel Combustion using a 2-Spray-Angle Group-Hole Nozzle. In: *Fuel* 88 (2009), Nr. 5, S. 843–852
- [77] PAWLOWSKI, A.: *Experimental Investigation of Interaction Process between Diesel-Sprays*. RWTH Aachen, Dissertation, 2009
- [78] PAWLOWSKI, A. ; KNEER, R. ; LIPPERT, A. M. ; PARRISH, S. E.: Investigation of the Interaction of Sprays from Clustered Orifices under Ambient Conditions Relevant for Diesel Engines. In: *SAE International Journal of Engines* 1 (2008), Nr. 1, S. 514–527
- [79] PAYRI, R. ; GARCÍA, J. M. ; SALVADOR, F. J. ; GIMENO, J.: Using Spray Momentum Flux Measurements to Understand the Influence of Diesel Nozzle Geometry on Spray Characteristics. In: *Fuel* 84 (2005), Nr. 5, S. 551–561
- [80] PICKETT, L. M. ; KOOK, S.: Effect of Ambient Temperature and Density on Shock Wave Generation in a Diesel Engine. In: *Atomization and Sprays* 20 (2010), Nr. 2, S. 163–175
- [81] PILCH, M. ; ERDMAN, C. A.: Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Breakup of a Liquid Drop. In: *International Journal of Multiphase Flow* 13 (1987), Nr. 6, S. 741–757
- [82] PLATEAU, J. A. F.: *Statique Expérimentale et Théorique des Liquides Soumis aux Seules Forces Moléculaires*. Bd. 2. Gauthier-Villars, 1873

- [83] POSTRIOTI, L. ; MARIANI, F. ; BATTISTONI, M.: Experimental and Numerical Momentum Flux Evaluation of High Pressure Diesel Spray. In: *Fuel* 98 (2012), S. 149–163
- [84] RAFFEL, M. ; WILLERT, C. E. ; WERELEY, S. T. ; KOMPENHANS, J.: *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*. 2007
- [85] RAYLEIGH, L.: On the Instability of Jets. In: *Proceedings of the London mathematical society* 1 (1878), Nr. 1, S. 4–13
- [86] REICHELT, L.: *Aerodynamischer Tropfenzerfall bei hohen Gasdrücken*. RWTH Aachen, Dissertation, 2004
- [87] REITZ, R. D. ; BRACCO, F. V.: Mechanism of Atomization of a Liquid Jet. In: *Physics of Fluids* 25 (1982), Nr. 10, S. 1730–1742
- [88] RHIM, D. ; FARRELL, P. V.: Effect of Gas Density and the Number of Injector Holes on the Air Flow Surrounding Non-Evaporating Transient Diesel Sprays. In: *SAE Technical Paper 2001-01-0532*, 2001
- [89] ROISMAN, I. V. ; ARANEO, L. ; TROPEA, C.: Effect of Ambient Pressure on Penetration of a Diesel Spray. In: *International Journal of Multiphase Flow* 33 (2007), Nr. 8, S. 904–920
- [90] ROTTENKOLBER, G. ; GINDELE, J. ; RAPOSO, J. ; DULLENKOPF, K. ; HENTSCHEL, W. ; WITTIG, S. ; SPICHER, U. ; MERZKIRCH, W.: Spray Analysis of a Gasoline Direct Injector by Means of Two-Phase PIV. In: *Experiments in Fluids* 32 (2002), Nr. 6, S. 710–721
- [91] SATHE, M. J. ; THAKER, I. H. ; STRAND, T. E. ; JOSHI, J. B.: Advanced PIV/LIF and Shadowgraphy System to Visualize Flow Structure in Two-Phase Bubbly Flows. In: *Chemical Engineering Science* 65 (2010), Nr. 8, S. 2431–2442
- [92] SCHMITT, M. ; JOVICIC, N.: Robert Bosch GmbH, Persönliche Mitteilung, 2016
- [93] SEIBEL, C. ; GARTUNG, K. ; ARNDT, S. ; WEIGAND, B.: Geschwindigkeitsmessungen im Nahbereich von Ventilen der Benzindirekteinspritzung mit der Laserkorrelationsvelocimetrie und Quantifizierung des Lufteintrags mit der Particle Image Velocimetry. In: *Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. Universität Karlsruhe, 2004
- [94] SEPRET, V. ; BAZILE, R. ; MARCHAL, M. ; COUTEAU, G.: Effect of Ambient Density and Orifice Diameter on Gas Entrainment by a Single-Hole Diesel Spray. In: *Experiments in Fluids* 49 (2010), Nr. 6, S. 1293–1305
- [95] SETTLES, G. S.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [96] SIEBERS, D. L.: Liquid-phase Fuel Penetration in Diesel Sprays. In: *SAE Technical Paper 1998:980809*, 1998
- [97] SOU, A. ; MAULANA, M. I. ; HOSOKAWA, S. ; TOMIYAMA, A.: Ligament Formation Induced by Cavitation in a Cylindrical Nozzle. In: *Journal of Fluid Science and Technology* 3 (2008), Nr. 5, S. 633–644

-
- [98] SOU, A. ; MAULANA, M. I. ; ISOZAKI, K. ; HOSOKAWA, S. ; TOMIYAMA, A.: Effects of Nozzle Geometry on Cavitation in Nozzles of Pressure Atomizers. In: *Journal of Fluid Science and Technology* 3 (2008), Nr. 5, S. 622–632
- [99] STEIMLE, F. ; KULZER, A. ; RICHTER, H. ; SCHWARZENTHAL, D. ; ROMBERG, C.: Systematic Analysis and Particle Emission Reduction of Homogeneous Direct Injection SI Engines. In: *SAE Technical Paper 2013-01-0248*, 2013
- [100] STETSYUK, V. ; CRUA, C. ; PEARSON, R. ; GOLD, M.: Direct Imaging of Primary Atomisation in the Near-Nozzle Region of Diesel Sprays. In: *Proceedings of the 26th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS)*. Bremen, Germany, 2014
- [101] TANNER, F. X.: Development and Validation of a Cascade Atomization and Drop Breakup Model for High-Velocity Dense Sprays. In: *Atomization and Sprays* 14 (2004), Nr. 3, S. 211–242
- [102] TANNER, F. X.: Evaporating Sprays. In: *Handbook of Atomization and Sprays*. Springer US, New York Dordrecht Heidelberg London, 2011, S. 263–278
- [103] TAYLOR, G.: Formation of Thin Flat Sheets of Water. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 259 (1960), Nr. 1296, S. 1–17
- [104] TROPEA, C. ; XU, T. ; ONOFRI, F. ; GRÉHAN, G. ; HAUGEN, P. ; STIEGLMEIER, M.: Dual-Mode Phase-Doppler Anemometer. In: *Part. Part. Syst. Charact.* 13 (1996), Nr. 2, S. 165–170
- [105] TROPEA, C. ; YARIN, A. L. ; FOSS, J. F.: *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [106] WANG, X. ; HUANG, Z. ; ZHANG, W. ; KUTI, O. A. ; NISHIDA, K.: Effects of Ultra-High Injection Pressure and Micro-Hole Nozzle on Flame Structure and Soot Formation of Impinging Diesel Spray. In: *Applied Energy* 88 (2011), Nr. 5, S. 1620–1628
- [107] WARNECKE, V. ; ACHLEITNER, E. ; BÄCKER, H.: Entwicklungsstand des Siemens VDO Piezo-Einspritzsystems für strahlgeführte Brennverfahren. In: *27. Internationales Wiener Motorensymposium*. Wien, Austria, 2006
- [108] WEBER, D. ; LEICK, P.: Structure and Velocity Field of Individual Plumes of Flashing Gasoline Direct Injection Sprays. In: *26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS)*. Bremen, Germany, 2014, S. 8–10
- [109] WENSING, M. ; VOGEL, T. ; GÖTZ, G.: Transition of Diesel Spray to a Supercritical State under Engine Conditions. In: *International Journal of Engine Research* 17 (2015), S. 108–119
- [110] WIGLEY, G. ; GOODWIN, M. ; PITCHER, G. ; BLONDEL, D.: Imaging and PDA Analysis of a GDI Spray in the Near-Nozzle Region. In: *Experiments in Fluids* 36 (2004), Nr. 4, S. 565–574
- [111] WINTER, J. ; DITTUS, B. ; KERST, A. ; MUCK, O. ; SCHULZ, R. ; VOGEL, A.: Nozzle Hole Geometry—a Powerful Instrument for Advanced Spray Design. In: *THIESEL 2004 conference on thermo-and fluid-dynamic processes in diesel engines, Valencia, Spain*, 2004, S. 19–34

- [112] WU, P.-K. ; MIRANDA, R. F. ; FAETH, G. M.: Effects of Initial Flow Conditions on Primary Breakup of Nonturbulent and Turbulent Round Liquid Jets. In: *Atomization and Sprays* 5 (1995), Nr. 2, S. 175–196
- [113] ZHANG, Y. ; NISHIDA, K. ; NOMURA, S. ; ITO, T.: Spray Characteristics of a Group-Hole Nozzle for Direct-Injection Diesel Engines. In: *Atomization and Sprays* 16 (2006), Nr. 1, S. 35–50
- [114] ZHANG, Z. ; ZIADA, S.: PDA Measurements of Droplet Size and Mass Flux in the Three-Dimensional Atomisation Region of Water Jet in Air Cross-Flow. In: *Experiments in Fluids* 28 (2000), Nr. 1, S. 29–35